

Diseño de una impresora 3D para la construcción de viviendas

MEMORIA

Autor: Sandra Amado Soriano

Director: Emilio Angulo Navarro

Mayo 2019

RESUMEN

La impresión 3D es una tecnología que se está imponiendo en muchos sectores, como son: la ingeniería, la sanidad, la construcción, el automovilismo, incluso en la alimentación.

La diversidad de diseños, de procesos de fabricación y de materiales empleados que ofrece, además de su abaratamiento y mayor accesibilidad, hacen que la mencionada tecnología sea objeto de estudio y análisis en el ámbito de la arquitectura.

Con este propósito, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar la estructura y mecanismo de movimiento de una impresora 3D con las dimensiones suficientes para poder construir una vivienda. Su estructura de fácil montaje y desmontaje permite su transporte e instalación en cualquier terreno preparado para la construcción.

A pesar de la existencia de algunos modelos en el mercado, éstos presentan una serie de limitaciones. Con el diseño de la máquina de impresión 3D se pretende aumentar el área de impresión, incrementar la dimensión del elemento construido y facilitar la impresión continua, sustituyendo la impresión de subelementos que acaban constituyendo la estructura de la vivienda.

Para alcanzar el objetivo, inicialmente se realiza la búsqueda de las diversas tecnologías de impresión 3D que existen actualmente en el mercado para poder identificar la que más se adecua a las especificaciones del producto.

A continuación, se estudian las configuraciones posibles para la máquina de impresión, clasificándolas por sus ventajas y desventajas. Esto permite realizar una selección del diseño mecánico más adecuado. Dicho diseño se lleva a cabo mediante el programa *SolidWorks®*, que permite crear el prototipo de la impresora. En la fase de diseño se contemplan las dimensiones y características de las piezas que componen la máquina.

Posteriormente, será necesario verificar la estructura de la impresora en cuanto a rigidez.

Para llevar a cabo el proyecto se ha analizado la competencia del mercado actual, teniendo en especial consideración la impresora de *3D Concrete Printing (3DCP)*. Ésta ha sido diseñada por un grupo de investigación que opera y desarrolla su propia Impresora 3D que extruye hormigón. Por tanto, el resultado obtenido es una impresora de similares características, pero con mayor superficie de impresión y altura.

SUMARIO

RESUMEN	1
SUMARIO	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	10
GLOSSARIO	12
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Objeto del proyecto	14
1.2. Alcance del proyecto	14
1.3. Justificación	15
1.3.1. Razones de negocio	15
1.3.2. Motivación personal	16
2. ESTADO DEL ARTE	17
2.1. Impresión 3D convencional	17
2.1.1. Historia de la impresión 3D	17
2.1.2. Tecnologías de impresión 3D	18
2.1.3. Materiales para la impresión 3D	25
2.1.4. Impresoras 3D	26
2.2. Impresión 3D en la construcción	28
2.2.1. Antecedentes de la impresión 3D en la construcción	28
2.2.2. Tecnologías de la impresión 3D en la construcción	29
2.2.3. Tecnologías de la impresión 3D en la construcción	31
2.2.4. Impresora 3D para la construcción	34
2.2.5. Arquitectura de las impresoras 3D para la construcción	39
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	44
4. DISEÑO CONCEPTUAL	47
4.1. Configuración de los ejes	49
4.2. Disposición de los ejes	52
4.3. Forma del chasis	53
5. DISEÑO DETALLADO	55
5.1. Descripción del conjunto	55
5.2. Eje Z	56

5.2.1. Elección del eje Z.....	60
5.2.2. Dimensionado del accionamiento del eje Z	63
5.2.3. Soportes y sujeciones.....	66
5.2.4. Determinación del peso de la manguera.....	67
5.3. Eje X.....	68
5.3.1. Elementos de transmisión de movimiento en eje X	71
5.3.1.1. Elección de la transmisión para el eje X	77
5.3.2. Motor en eje X.....	78
5.3.2.1. Elección del motor para el eje X	80
5.3.3. Final de carrera	84
5.4. Eje Y.....	85
5.4.1. Elementos de transmisión de movimiento en eje Y	88
5.4.2. Motor en eje Y	88
5.4.3. Cálculo de deformaciones.....	90
5.5. Estructura soporte.....	95
5.5.1. Dimensionamiento de los travesaños en eje X	97
5.5.2. Dimensionamiento a pandeo de los pilares	97
5.5.3. Comprobación de la estructura por elementos finitos	101
6. ESTUDIO ECONÓMICO	106
7. PLANIFICACIÓN	107
8. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	111
8.1. Impacto ambiental de las tecnologías de impresión 3D.....	111
8.2. Impacto ambiental de la fabricación de la impresora	111
8.3. Impacto ambiental del material de impresión.....	112
9. CONCLUSIONES	113
AGRADECIMIENTOS	115
BIBLIOGRAFIA	116
Referencias bibliográficas.....	116
Bibliografía complementaria.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Optimización del proceso de construcción [1].	16
Fig. 2.1. Proceso de FDM [5].	19
Fig. 2.2. Proceso de SLA [5].	20
Fig. 2.3. De arriba a abajo: proceso de SLS, proceso de DMLS [5].	21
Fig. 2.4. Proceso de EBM [4].	22
Fig. 2.5. Proceso de 3DP [5].	22
Fig. 2.6. Proceso de LOM [5].	23
Fig. 2.7. Proceso de MJF. Fuente: www.materialise.com/es/ .	24
Fig. 2.8. Clasificación de las tecnologías de Fabricación Aditiva.	24
Fig. 2.9. Impresoras tipo hobby: Prusia i3 [3] y BCN3D Sigma R19. Fuente: https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/	26
Fig. 2.10. Impresoras 3D industriales para metal (ProX DMP) y para plástico (ProX SLS 6100), respectivamente. Fuente: https://es.3dsystems.com/	27
Fig. 2.11. Impresoras 3D industriales para odontología (DMP Dental 100) y para fundición de metal (ProJet MJP 2500 IC), respectivamente. Fuente: https://es.3dsystems.com/	27
Fig. 2.12. Similitudes y diferencias entre tecnologías [9].	29
Fig. 2.13. Tecnología Contour Crafting [13].	29
Fig. 2.14. Proceso constructivo Contour Crafting [13].	30
Fig. 2.15. Tecnología 3D Concrete Printing. Fuente: http://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp/	30
Fig. 2.16. Construcción realizada mediante tecnología D-Shape [8].	30
Fig. 2.17. Tecnología D-Shape [8].	31
Fig. 2.18. Propiedades del material empleado por la empresa D-Shape [8].	32
Fig. 2.19. 23 años de desarrollo de la impresión 3D, dentro del sector de la arquitectura. Fuente: https://3dprint.com/222125/contour-crafting-dod-contract/	34

Fig. 2.20. Edificio de apartamentos, villa en China, oficinas en Dubai y conjunto de casas en Shanghai, mostrado de izquierda a derecha y de arriba a abajo [16].	35
Fig. 2.21. Suite del Lewis Gran Hotel en Filipinas. Fuente: http://www.totalkustom.com/	36
Fig. 2.22. Castillo impreso en Minnesota, EE.UU, e impresora Stroybot2. Fuente: http://www.totalkustom.com/	36
Fig. 2.23. Impresora de TU/e, 3DCP. Fuente: https://3dprintedhouse.nl/en/	36
Fig. 2.24. Proyecto Milestone de TU/e. Fuente: https://3dprintedhouse.nl/en/	36
Fig. 2.25. Impresora KamerMaker de DUS Architects. Fuente: http://houseofdus.com/#section-manifesto	37
Fig. 2.26. Impresora de la compañía Apis Cor [1].	37
Fig. 2.27. Impresora BigDelta de WASP. Fuente: https://www.3dwasp.com/	38
Fig. 2.28. Nueva impresora Crane WASP-The Infinity 3D Printer.	38
Fig. 2.29. The BOD [18].	38
Fig. 2.30. Impresora BOD2-353 de COBOD. Fuente: http://cobod.com/bod2/	38
Fig. 2.31. Impresora CazzaX1. Fuente: https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/cazza-x1/	39
Fig. 2.32. Impresora 3D Constructor. Fuente: https://www.constructions-3d.com/technical-data	39
Fig. 2.33. Impresora CyBe RC 3Dp de la empresa CyBe. Fuente: https://cybe.eu/3d-concrete-printers/	40
Fig. 2.34. SpiderBot desarrollado por Neri Oxman. Fuente: http://www.bn timers.com/spiderbot.html	41
Fig. 2.35. Robot cartesiano de Contour Crafting suspendido por cables, C ⁴ Robot [19].	41
Fig. 2.36. Base Robot de IAAC. Fuente: https://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-print-structures-of-any-size	42
Fig. 2.37. Grip Robot de IAAC. Fuente: https://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-print-structures-of-any-size	42

Fig. 2.38. Vacuum Robot del IAAC. Fuente: https://www.autodesk.com/redshift/drone-3d-printer/	43
Fig. 4.1. Análisis funcional de la impresora 3D.	47
Fig. 4.2. Detalle de las partes de una impresora 3D de gran escala. Fuente de ilustraciones: https://www.uskoreahotlink.com/products/factory-automation/gantry-robots-rack-and-pinion/	48
Fig. 4.3. Configuraciones más usuales de los robots industriales. Fuente: https://www.monografias.com	49
Fig. 4.4. Configuración cartesiana, tipo pórtico.	49
Fig. 4.5. Esquema de la variación de la velocidad en función del ángulo.	50
Fig. 4.6. Configuración paralela, tipo Delta. Fuente: https://docplayer.es/	50
Fig. 4.7. Configuración esférica. Fuente: https://docplayer.es/	51
Fig. 4.8. Configuración cilíndrica. Fuente: https://docplayer.es/	51
Fig. 4.9. Configuración angular, tipo antropomórfica (brazo humano). Fuente: https://docplayer.es/	51
Fig. 4.10. Posibles formas de la estructura. Fuentes: http://www.concrete-3dprinter.com/products.php (A), http://www.directindustry.com (B y C) y https://dshape.wordpress.com/applications/ (D).	53
Fig. 4.11. Esquema de la estructura escogida para el diseño.	54
Fig. 5.1. CAD del diseño detallado de la impresora 3D.	55
Fig. 5.2. Cabezal extrusor [16].	56
Fig. 5.3. Esquema del sistema de guías, del accionamiento y del conjunto del módulo lineal, de izquierda a derecha [23].	56
Fig. 5.4. Esquema de la conexión del motor con el reductor y, a su vez, con el módulo lineal [23].	57
Fig. 5.5. CAD completo y detalle del Eje Z.	59
Fig. 5.6. Interruptor inductivo de fin de carrera y de referencia [23].	62

Fig. 5.7. Interruptor mecánico [23].	62
Fig. 5.8. Detalle del Eje X.	69
Fig. 5.9. CAD completo del Eje X.	70
Fig. 5.10. Alternativas de Hepco Motion disponibles para guías [24].	71
Fig. 5.11. Lubricación automática para las caperuzas [24].	74
Fig. 5.12 CAD del conjunto ensamblado de los elementos de transmisión de movimiento.	76
Fig. 5.13. Método de unión de las guías en V [24].	77
Fig. 5.14. Detalle de la cremallera helicoidal [24].	77
Fig. 5.15. Colocación de la guía sobre el espaciador [24].	77
Fig. 5.16. Colocación de los rodamientos y protección mediante caperuzas de retén [24].	78
Fig. 5.17. Motores Rexroth para análisis de alternativas [23].	79
Fig. 5.18. Esquema del sistema de movimiento. Fuente: www.brushlessmotor.es	80
Fig. 5.19. Comparativa de los dos modelos de motor a estudiar [23].	82
Fig. 5.20. Características de las curvas revolución-par del motor, máximas [23].	82
Fig. 5.21. CAD del motor con el detalle de sus partes [23].	83
Fig. 5.22. CAD de los topes de goma de Hepco Motion.	84
Fig. 5.23. Detalle del Eje Y.	86
Fig. 5.24. CAD completo del Eje Y.	87
Fig. 5.25. Características de las curvas revolución-par del motor, máximas [23].	89
Fig. 5.26. Esquema de la flecha producida por el propio peso.	93
Fig. 5.27. Esquema de la flecha producida por una fuerza externa.	93
Fig. 5.28. CAD completo y detalle de la estructura soporte.	96

Fig. 5.29. Condiciones de contorno y cargas sobre la estructura soporte.....	102
Fig. 5.30. Deformación y tensión de Von Mises de la estructura, con escala de aumento $1,3e+3$	104
Fig. 7.1. Relación del esfuerzo y el tiempo, en función de la etapa del proyecto.	108
Fig. 8.1. Unidad de mezcla y suministro automatizados [17].	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Materiales empleados en los diferentes métodos de impresión.	25
Tabla 2.2. Comparativa entre tecnologías de impresión en el ámbito de la macroescala.	33
Tabla 2.3. Comparativa de arquitecturas de las impresoras 3D para la construcción.	43
Tabla 3.1. Especificaciones técnicas de la impresora BOD2 de COBOD. Fuente: http://cobod.com/bod2/	45
Tabla 3.2. Especificaciones técnicas de la impresora ApisCor [1].	45
Tabla 3.3. Especificaciones técnicas de la impresora BigDelta de WASP. Fuente: https://www.3dwasp.com/	46
Tabla 3.4. Especificaciones de la impresora 3D diseñada.	46
Tabla 4.1. Matriz de selección de la configuración según arquitectura.	52
Tabla 4.2. Matriz de selección de la configuración según necesidades del cliente.	52
Tabla 5.1. Listado de piezas que componen el eje Z.	58
Tabla 5.2. Datos básicos del perfil del eje Z [23].	60
Tabla 5.3. Datos técnicos generales [23].	60
Tabla 5.4. <i>Datos técnicos del reductor [23].</i>	61
Tabla 5.5. Datos técnicos del sistema de accionamiento [23].	61
Tabla 5.6. Datos dimensionales de la unión del motor y el reductor [23].	61
Tabla 5.7. Datos técnicos del motor [23].	61
Tabla 5.8. Opciones estudiadas para la organización de cables.	66
Tabla 5.9. Listado de piezas que forman parte del eje X.	68
Tabla 5.10. Datos para una primera selección de las guías y rodamientos [24].	72
Tabla 5.11. Dimensiones principales de la guía de Simple Canto en V [24].	72

Tabla 5.12. Dimensiones principales de los espaciadores estrechos [24].	73
Tabla 5.13. Dimensiones principales de los rodamientos en V [24].	74
Tabla 5.14. Dimensiones principales de las caperuzas de retén [24].	74
Tabla 5.15. Dimensiones principales de la lubricación automática de la cremallera [24].	75
Tabla 5.16. Dimensiones principales de los carros [24].	75
Tabla 5.17. Dimensiones principales del ensamblaje de la brida de accionamiento [24].	76
Tabla 5.18. Comparativa de motores.	78
Tabla 5.19. Características técnicas principales para la selección del motor [23].	81
Tabla 5.20. Especificaciones del motor sin freno [23].	83
Tabla 5.21. Dimensiones del motor [23].	83
Tabla 5.22. Dimensiones de los topes de goma. Fuente: www.hepcomotion.com/es .	84
Tabla 5.23. Listado de piezas que componen el eje Y.	85
Tabla 5.24. Especificaciones del motor sin freno [23].	89
Tabla 5.25. Dimensiones del motor [23].	89
Tabla 5.26. Tolerancias dimensionales de los perfiles. Fuente: www.protubsa.com .	90
Tabla 5.27. Momento de inercia y masa según dimensiones de la sección. Fuente: www.protubsa.com .	91
Tabla 5.28. Rendimientos geométricos de las secciones [21]	92
Tabla 5.29. Listado de piezas que componen la estructura soporte.	95
Tabla 5.30. Factores de pandeo en función de las articulaciones de los extremos.	98
Tabla 6.1. Coste del proyecto y de instalación del prototipo.	106
Tabla 7.1. Programación temporal del proyecto.	108
Tabla 8.1. Comparativa entre especificaciones técnicas impuestas y características del diseño.	113

GLOSSARIO

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno; *Acrylonitrile Butadiene Styrene*.

AM: Fabricación aditiva; *Additive Manufacturing*.

BPM: Fabricación por chorro de partículas; *Ballistic Particle Manufacturing*.

CAD: Diseño asistido por computadora; *Computer-Aided Design*.

CNC: Control Numérico por Computadora.

CTE: Código Técnico de la Edificación.

DB: Documento Básico.

DLP: Procesamiento digital de luz; *Digital Light Processing*.

DMLS: Sinterización directa de metal por láser; *Direct Metal Laser Sintering*.

EBM: Fusión por haz de electrones; *Electron Beam Melting*.

FDM: Modelado por deposición fundida; *Fused Deposition Modeling*.

FFF: Fabricación con filamento fundido; *Fused Filament Fabrication*.

IAAC: Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya; *Institute for Advanced Architecture of Catalonia*.

RP: Prototipado rápido; *Rapid Prototyping*.

SCARA: *Selective Compliant Assembly/Articulated Robot Arm*.

SE-A: Seguridad Estructural del Acero.

SGC: Fotopolimerización ultravioleta; *Solid Ground Curing*.

SLA: Estereolitografía; *Stereolithography Apparatus*.

SLS: Sinterización selectiva por láser; *Selective Laser Sintering*.

LOM: Fabricación por corte y laminado; *Laminated Object Manufacturing*.

MIT: Instituto de tecnología de Massachusetts; *Massachusetts Institute of Technology*.

MJF: *Multi Jet Fusion*.

PLA: Ácido poliláctico; *Polylactic Acid*.

PVA: Alcohol de polivinilo; *Polyvinyl Alcohol*.

3DP: Impresión tridimensional; *Three-dimensional Printing*.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto del proyecto

El objeto de este proyecto se centra en el diseño de una impresora 3D capaz de construir paredes completas de una vivienda, parte de un edificio, incluso mobiliario urbano de dimensiones considerables; con la calidad y características deseadas.

A partir del mismo se intenta mejorar el sector de la construcción, dotando de más automatización al proceso constructivo, reduciendo el precio final de la vivienda, aumentando la protección del medio ambiente y disminuyendo el tiempo de fabricación, entre otras ventajas.

La finalidad del diseño es ser competitivo, satisfaciendo las necesidades de los clientes, mejorando las especificaciones de las actuales impresoras y disminuyendo las restricciones de éstas, en la medida de lo posible.

1.2. Alcance del proyecto

Este trabajo engloba lo siguiente:

- Análisis de las tecnologías empleadas para la impresión en 3D.
- Estudio de los tipos de impresora en el mercado, tanto las convencionales como las del ámbito de la construcción.
- Descripción de los materiales usados por las impresoras anteriormente estudiadas.
- Determinación de la arquitectura más adecuada para diseñar una máquina con las especificaciones requeridas.
- Diseño mecánico detallado de la estructura y del sistema de transmisión de una impresora 3D de grandes dimensiones, pasando por,
 - o el cálculo de las dimensiones de los componentes de la estructura (perfiles, soportes, uniones...),
 - o el análisis y la elección de los elementos de transmisión de movimiento (guías y motores),
 - o la determinación de la sujeción del cableado,
 - o y la distribución espacial de los elementos que constituyen la impresora.
- Obtención de la rigidez a partir de cálculos analíticos y por simulación mediante elementos finitos.

Sin embargo, no se alcanza la construcción real del prototipo, así como tampoco la programación del software ni la elección del hardware, que determinarían el funcionamiento del conjunto de la impresora y del cabezal.

Tampoco se analiza en detalle los materiales que pueden ser empleados por las impresoras 3D, por lo que no es posible determinar la composición de una mezcla extruible y construible. Esto, a su vez, imposibilita el diseño del cabezal extrusor. La complejidad de estos conceptos hace que no se incluya en el alcance del presente proyecto.

Para el desarrollo de los conceptos a implementar serán necesarios dos enfoques: uno bibliográfico para investigar la fabricación por adición y otro, práctico, de implementación del sistema sobre el papel.

Finalmente, se añade la planificación seguida para la elaboración del proyecto, un estudio económico simplificado y un breve estudio medio ambiental, acorde a la información disponible.

1.3. Justificación

1.3.1. Razones de negocio

El interés por la impresión 3D, desde el punto de vista industrial, deriva en gran medida de la generosa suma de posibilidades que ofrece en los diferentes sectores, de la gama de productos que permite obtener y de la variedad de materiales con los que puede trabajar. Estas razones hacen que sea más atractiva la investigación de mejoras y aplicaciones relacionadas con la tecnología de impresión.

La razón principal de negocio, dentro del ámbito de la construcción, es que la tecnología de la impresión 3D se presenta como un nuevo método constructivo, muy competente en el actual mercado por sus múltiples ventajas, a pesar de encontrarse en su fase preliminar.

Pretende complementar el proceso de construcción convencional con un proceso más automatizado, el cual permite fabricar estructuras completas y de manera más eficiente. Su mecánica y electrónica dotan de libertad geométrica al diseño de las paredes, pudiendo dibujar contornos o superficies tanto rectos como curvos, sin necesidad de moldes o encofrados.

Además, ofrece la posibilidad de transformar in-situ, mediante maquinaria adicional y externa a la impresora 3D, las materias primas utilizadas para la extrusión en productos finales. Por tanto, no hay necesidad de moverse del lugar de impresión ni de emplear moldes, reduciendo así los residuos generados. Para conseguirlo se emplea un proceso basado en la adición de material, denominado Fabricación Aditiva (*Additive Manufacturing*, AM).

Esto, junto el reducido tiempo y la poca energía gastados por las máquinas actualmente patentadas, se consigue disminuir el coste de construcción y aumentar la eficiencia ambiental en términos del proceso de fabricación, significativamente.

Al mismo tiempo, con la independencia de la mano de obra humana se consiguen evitar en mayor medida los riesgos laborales y seguir reduciendo costes.

Por tanto, es clara la necesidad de invertir en esta tecnología como alternativa económica y flexible.

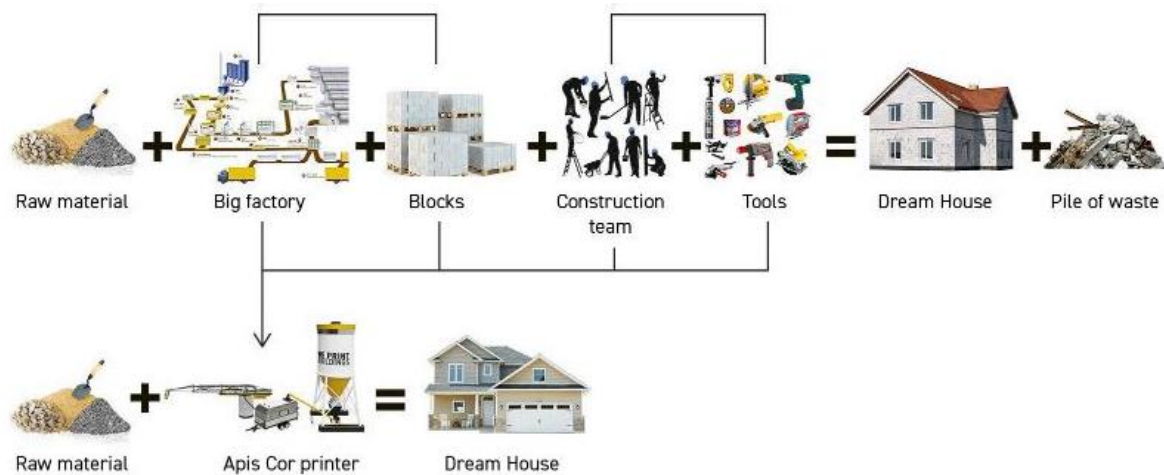


Fig. 1.1. Optimización del proceso de construcción [1].

1.3.2. Motivación personal

La motivación principal para realizar este proyecto es la oportunidad de poder colaborar en el desarrollo de la impresión 3D, tecnología que se encuentra en continuo crecimiento.

Existe una gran cantidad de información acerca de la impresión de polímeros, así como documentación sobre proyectos que han investigado y mejorado el rendimiento de las impresoras que utilizan esta clase de material. Sin embargo, la disponibilidad de información sobre las máquinas de gran tamaño que emplean como material el hormigón es muy escasa e incompleta. Esto supone un gran reto con respecto a la ejecución del proyecto.

No obstante, la elaboración de éste permite adquirir conocimientos nuevos y aplicar los aprendidos en asignaturas como, por ejemplo, *Resistencia de Materiales*, *Expresión Gráfica* y *Sistemas de Fabricación*. Personalmente, el interés en el diseño gráfico mediante la herramienta de diseño CAD en 3D, *SolidWorks*, ha sido siempre destacable por su aplicación práctica. Dando continuidad al uso de este programa, se puede adquirir agilidad y conocer en mayor profundidad sus posibles aplicaciones.

Además, a lo largo de la carrera universitaria y siempre que ha sido posible, se ha aprovechado la ocasión para introducir la impresión 3D como método de fabricación en los trabajos entregados. La experiencia siempre ha sido gratificante y ha aumentado la inquietud por seguir con el aprendizaje y continuar en un futuro con la investigación sobre la impresión 3D.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Impresión 3D convencional

El concepto de “impresión 3D” se basa en métodos de fabricación aditiva.

Este tipo de fabricación consiste en convertir un modelo digital tridimensional, creado por un programa de modelado (CAD), en un objeto físico mediante la adición de material, normalmente por superposición de capas sucesivas. El archivo es interpretado por la impresora convirtiendo los datos y geometrías digitales en instrucciones mecánicas que establecen el lugar donde se debe añadir el material.

Un término empleado como sinónimo de la fabricación aditiva es el *Rapid Prototyping* (RP, Prototipado rápido), ya que permite transformar ideas en productos finales de forma rápida y barata exitosamente, a diferencia de algunos métodos tradicionales.

2.1.1. Historia de la impresión 3D

Pese a que la primera patente de impresión 3D no fue otorgada hasta finales del siglo XX, en 1859 y en 1892 se realizaron varios acercamientos a la obtención de objetos en 3D, de forma similar en concepto a las impresoras actuales. No obstante, hasta 1980 no se patentó un dispositivo que endurecía polímeros fotorreactivos mediante luz ultravioleta, inventado por el Dr. Hideo Kodama del Instituto de Investigación Industrial Municipal de Nagoya (Japón).

Años después, en 1986, Chuck Hull, cofundador de *3D Systems Corporation*, patenta el aparato de estereolitografía (SLA) y así denomina al proceso, siendo una de las técnicas más comunes en la actualidad.

Durante ese mismo periodo, se desarrollan otras técnicas como la de unir y solidificar polvo a través del uso del láser (sinterización selectiva por láser, SLS), a diferencia del proceso de resina líquida de Chuck Hull. En este método alternativo fue pionero Carl Deckard en 1987. Sin embargo, no es hasta 2006 que se crea la primera máquina de impresión SLS. También se presenta la patente del modelado por deposición fundida (FDM) por parte de S. Scott Crump, cofundador de *Stratasys Inc.*, en 1989. Esta técnica se basa en la fundición de filamentos de polímero para ser depositados, capa por capa, en un sustrato. Finalmente, la patente fue entregada a *Stratasys Inc.* en 1992.

En la misma época surgen otras tecnologías y procesos de impresión 3D como *Ballistic Particle Manufacturing* (BPM), *Laminated Object Manufacturing* (LOM), *Solid Ground Curing* (SGC) y *Three-dimensional Printing* (3DP).

A principios de 2004, Adrian Bowyer en Inglaterra inicia el proyecto RepRap, *Replicated Rapid Prototyper*, con el objetivo de fabricar una impresora capaz de replicarse, imprimiendo sus propios componentes. Utiliza la técnica FDM y se caracteriza por ser económica, efectiva y de consumo para el público en el hogar. Se diseñaron varias impresoras 3D RepRap, las cuales se bautizaron con nombres de famosos biólogos evolutivos, por tratarse de un proyecto basado en la replicación y la evolución.

Las principales ideas del proyecto RepRap se encuentran detalladas en el documento que los creadores, D. Holland, G. O'Donnell y G. Bennett publicaron: *Open Design and the Reprap Project* [2], [3].

Es a partir de la segunda década del siglo XXI, que el coste de las impresoras va disminuyendo, la demanda de esta tecnología se dispara y ésta se vuelve más accesible para las pequeñas empresas y hogares. Así se distinguen dos vertientes: una enfocada a la industria y al mercado especializado, en la que se introducen mejoras en las máquinas de elevado coste de los sectores del automovilismo, la medicina, la aeroespacial, la construcción; otra enfocada al público más amplio, para el que se desarrollan máquinas fáciles de usar y de precio mucho más bajo [4].

2.1.2. Tecnologías de impresión 3D

Son numerosas las tecnologías que tratan el prototipado rápido, por eso se describen a continuación las más relevantes:

- **Deposición por hilo fundido (FDM):** tecnología creada por S. Scott Crump y patentada con este nombre alrededor de los años 90 por *Stratasys, Inc.* Dado su estado de protección por la patente, se estableció un término equivalente que se pudiera utilizar legalmente sin limitaciones, el denominado *Fused Filament Fabrication* (FFF).

Se trata de una técnica que utiliza la extrusión de material termoplástico. A través de la resistencias se calienta el material hasta llevarlo a un estado semi-líquido y, debido a la presión que ejerce el material traccionado, éste se deposita sobre una plataforma sobre la que solidifica, según los parámetros suministrados a la impresora desde el archivo .STL del modelo digital creado en CAD. Dada la temperatura del material, 1°C por debajo de su punto de fusión, la capa sucesiva recae sobre la capa anterior ya solidificada.

Los materiales más comunes para estas impresoras son el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Políácido láctico (PLA), aunque también es posible usar otros termoplásticos y compuestos. Sin embargo, dependiendo de la geometría a imprimir, será necesario el uso de estructuras de soporte de un segundo material soluble en agua, el alcohol de polivinilo (PVA). De modo que son de fácil extracción una vez se ha completado la impresión.

La falta de adhesión entre capas, la geometría y la precisión limitada de la boquilla extrusora pueden provocar acabados rugosos, posibles de solucionar con procesos de lijado y pulido.

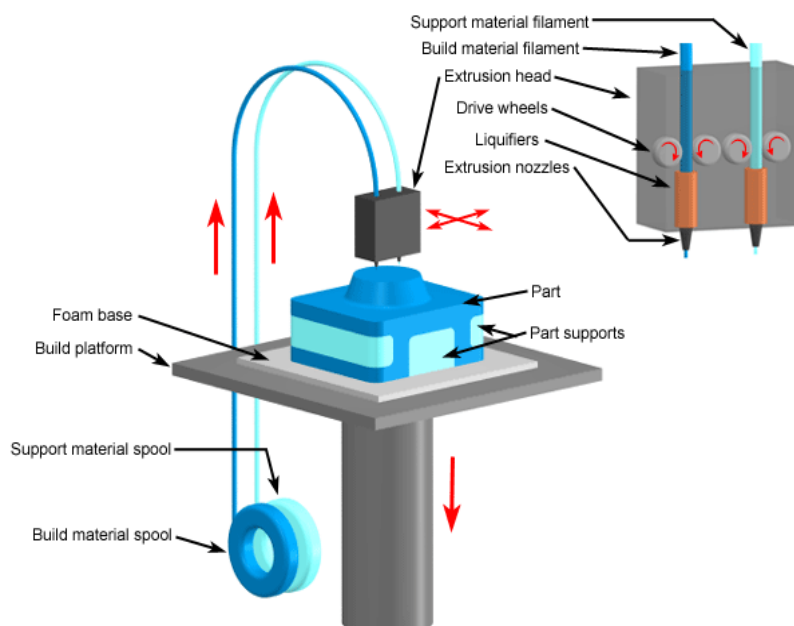


Fig. 2.1. Proceso de FDM [5].

- **Estereolitografía (SLA):** la primera tecnología comercializada, la cual fue desarrollada por 3D Systems Corporation.

Funciona con resinas líquidas de fotopolímero que solidifican al reaccionar frente a la proyección de un haz de láser UV generalmente, dando lugar a la fotopolimerización¹. En una tina se almacena la resina y la plataforma móvil, situada a una altura igual al grosor de la primera capa, sobre la que va a ir solidificando el material. El láser realiza los movimientos en los ejes X-Y, de acuerdo con los datos que se le suministran a la máquina a partir del archivo 3D, y golpea la superficie de la resina que se desea endurecer. La zona de la capa que es alcanzada por el proyector se solidifica, mientras que la zona en penumbra permanece líquida y efectúa la función de soporte. El elevador de la plataforma cae en el eje Z, dejando el grosor necesario, para recubrir la capa solidificada con resina líquida para la capa siguiente. El ciclo se repite hasta completar el objeto. En el instante en que el proceso finaliza, la plataforma se eleva para limpiar y curar la pieza en caso de necesidad, sometiéndola a una luz intensa para endurecerla completamente.

La naturaleza del proceso hace que se requiera de estructuras de soporte para los voladizos o recortes, que posteriormente se deberán eliminar manualmente. Si bien, la estereolitografía es la tecnología más adecuada si se requiere de un resultado final con precisión.

¹ **Fotopolimerización:** proceso químico en el que pequeñas moléculas, monómeros, se agrupan formando polímeros, usando como catalizador un rayo de energía luminosa.

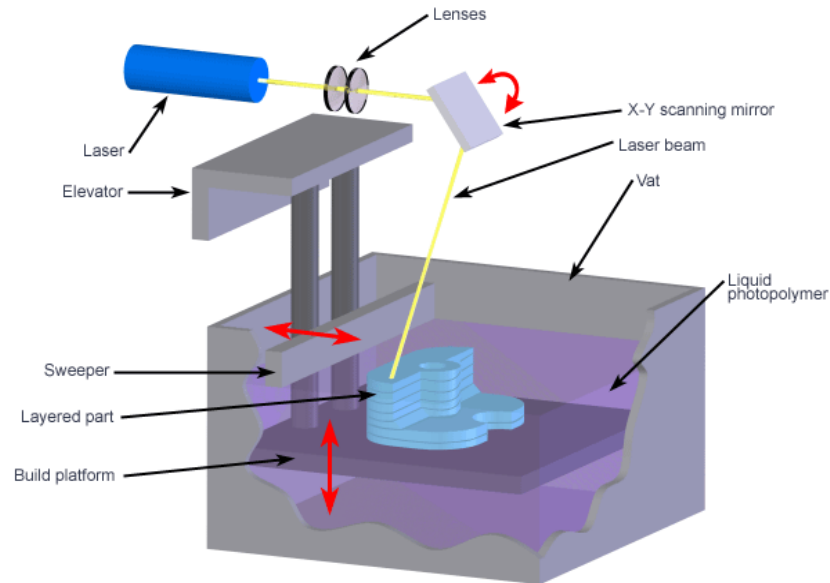


Fig. 2.2. Proceso de SLA [5].

- **Fotopolimerización ultravioleta (SGC):** un proceso muy similar al anterior, dado que también radica en solidificar un fotopolímero líquido o resina fotosensible mediante una lámpara ultravioleta. La diferencia entre el SLA y el SGC reside en que el material depositado en la tina se somete, a través de una máscara, a una fuente de luz ultravioleta de alta energía, que se aplica sobre todos los puntos de la sección a la vez [4]. También proporciona buenos acabados superficiales y buena precisión. Además, es posible generar varias piezas simultáneamente.
- **Sinterización selectiva por láser (SLS):** tecnología inventada por Carl Deckard en 1987, un inventor americano pionero en la sinterización o fusión de partículas de polvo y/o compuestos metálicos, por medio de proceso similar al de SLA.

Un láser generador de calor de CO_2 traza y sinteriza materiales poliméricos sobre una plataforma que se sitúa a una altura igual al espesor de la capa, de manera que sobre cada capa solidificada se deposita polvo adicional para la siguiente. El polvo de la tina se mantiene a temperatura elevada para facilitar la fusión al reaccionar con el láser.

Es imprescindible que el láser defina la geometría adecuadamente, ya que el exceso de polvo no solidificado hace la función de soporte. Esta es una de las principales diferencias entre la SLS y la SLA.

El rango de materiales con el que permite trabajar este proceso es muy amplio. Algunos ejemplos son el nylon, nylon relleno de vidrio, gomas y compuestos de metales. Estos últimos precisan de un láser de mayor potencia y de temperaturas de proceso más elevadas.

El uso de polvo metálico como material implica la utilización de la tecnología de la **Sinterización directa de metal por láser (DMLS)**, la cual permite obtener piezas más densas, de hasta el 90%, en comparación a la SLS que son de aproximadamente 70% de densidad. Al mismo tiempo, se obtiene una mayor resolución de detalle por el uso de capas más delgadas, gracias al reducido diámetro de las partículas de polvo.

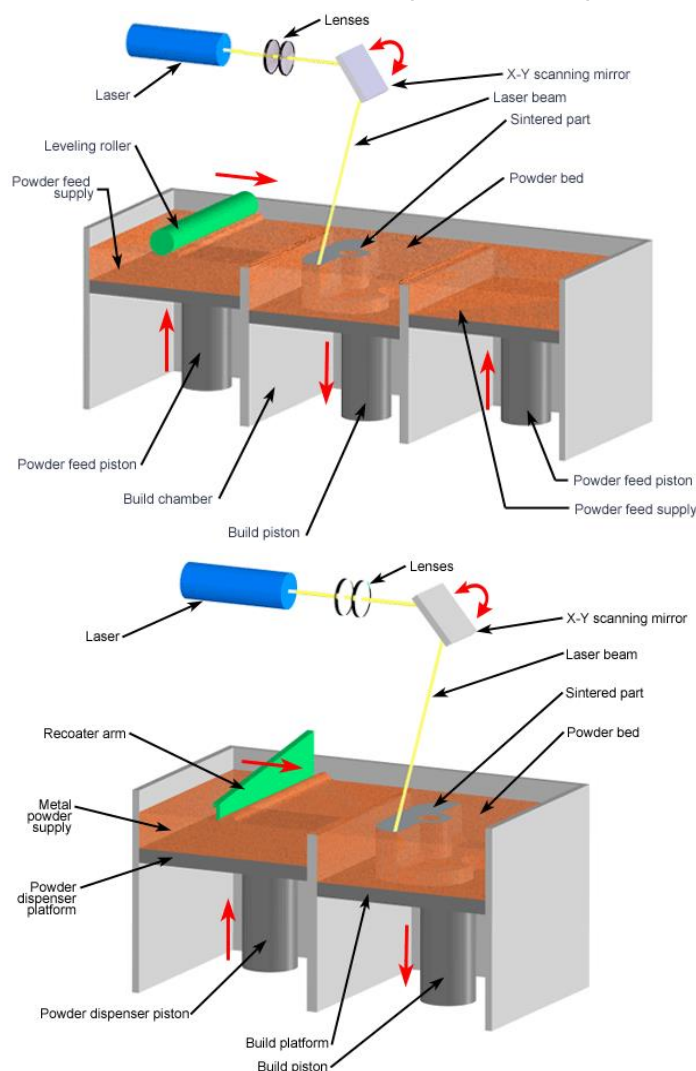


Fig. 2.3. De arriba a abajo: proceso de SLS, proceso de DMLS [5].

- **Fusión por haz de electrones (EBM):** proceso patentado desarrollado por la compañía sueca Arcam. Es similar al DMLS en cuanto a la formación de piezas de polvo de metal. La diferencia se encuentra en la fuente de calor utilizada, que como el nombre de la tecnología indica, es un haz de electrones y no un láser.

Para la construcción de las capas se necesita una cámara al vacío, a través de la cual los electrones circulan, siendo redirigidos hacia la plataforma con metal en polvo y fundiendo la primera capa del material. El proceso se repite sucesivamente, superponiendo capas de metal, hasta obtener la pieza deseada.

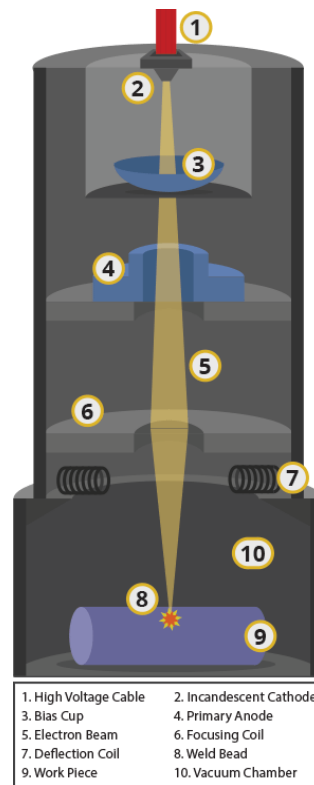


Fig. 2.4. Proceso de EBM [4].

- **Tecnología de impresión tridimensional (3DP):** tecnología desarrollada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Es similar al proceso de SLS, pero no emplea el láser para sinterizar el material, sino que dispone de un cabezal de impresión, el cual deposita un adhesivo líquido que se encarga de unir el material: polvos metálicos o cerámicos.

No genera material de desecho, dado que el polvo adherido al modelo se puede reutilizar para posteriores impresiones. Las piezas que se adquieren se suelen infiltrar con un sellador con el fin de mejorar su resistencia y acabado superficial.

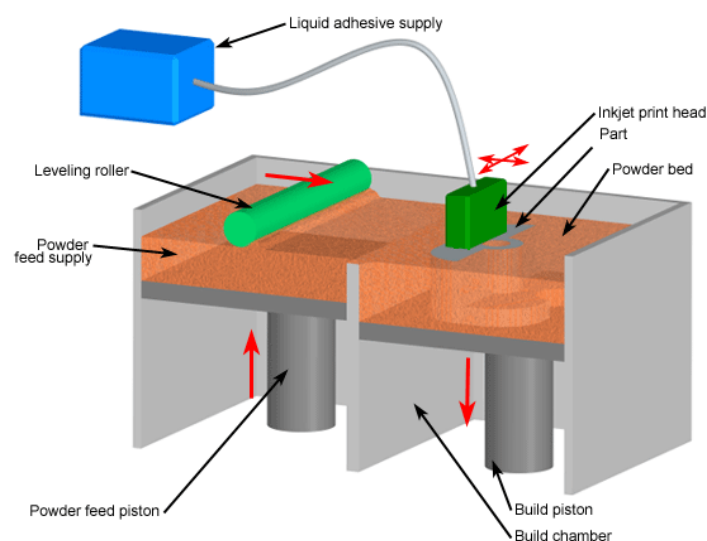


Fig. 2.5. Proceso de 3DP [5].

- **Fabricación por corte y laminado (LOM):** sistema comercial de fabricación de objetos laminados desenvuelto por Helisys of Torrance, C.A.

Consiste en apilar láminas de material recubiertas de adhesivo por la parte de abajo, prensadas con un rodillo calentado para unir la hoja superior con la capa inmediatamente inferior. Un láser se encarga de cortar la forma deseada de la pieza en cada capa y tras cada nuevo corte, la plataforma de trabajo baja la profundidad correspondiente al espesor de la hoja, dejando paso a la siguiente lámina. Cuando ésta se sitúa en el lugar deseado, la plataforma sube ligeramente para hacer presión con el rodillo y se realiza el corte del contorno con el láser. Entonces, el proceso de repite hasta completar la pieza.

Algunas de las ventajas de esta tecnología son que el material extra se emplea de soporte y que ofrece gran precisión, pero para esto último se debe ajustar de manera muy precisa la potencia del láser con anterioridad.

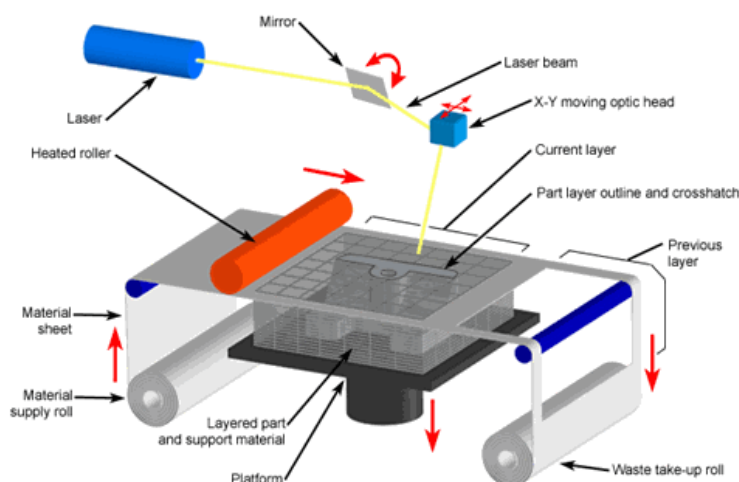


Fig. 2.6. Proceso de LOM [5].

- **Multi Jet Fusion (MJF):** el proceso consiste en inyectar un agente de fusión para fundir selectivamente las partículas de polvo que se encuentran sobre el lecho de impresión y un agente de detalle para mejorar la resolución de los contornos. Sin uso de haz láser, unas lámparas pasan sobre la superficie del polvo de manera constante para que el material proyectado capture el calor.

Este proceso se repite para cada capa de material para construir el objeto y no es hasta el final, que se elimina el material sobrante.

Permite obtener capas muy finas, que aumentan considerablemente la densidad, pero disminuyen la porosidad en las piezas respecto a las elaboradas mediante sinterización por láser. Además, ofrece superficies lisas y piezas funcionales sin prácticamente necesidad de procesos de acabado.

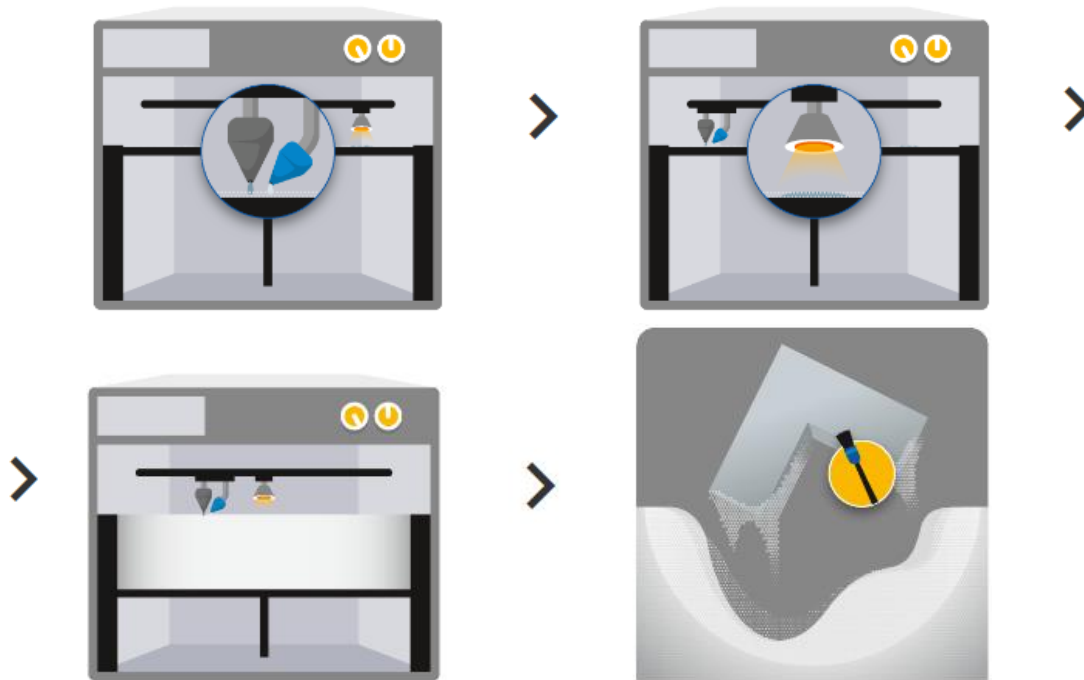


Fig. 2.7. Proceso de MJF. Fuente: www.materialise.com/es/.

Para resumir de manera más intuitiva los procesos de fabricación aditiva descritos anteriormente e incluir otros que también existen actualmente, se propone la clasificación mostrada en la Fig. 2.8.

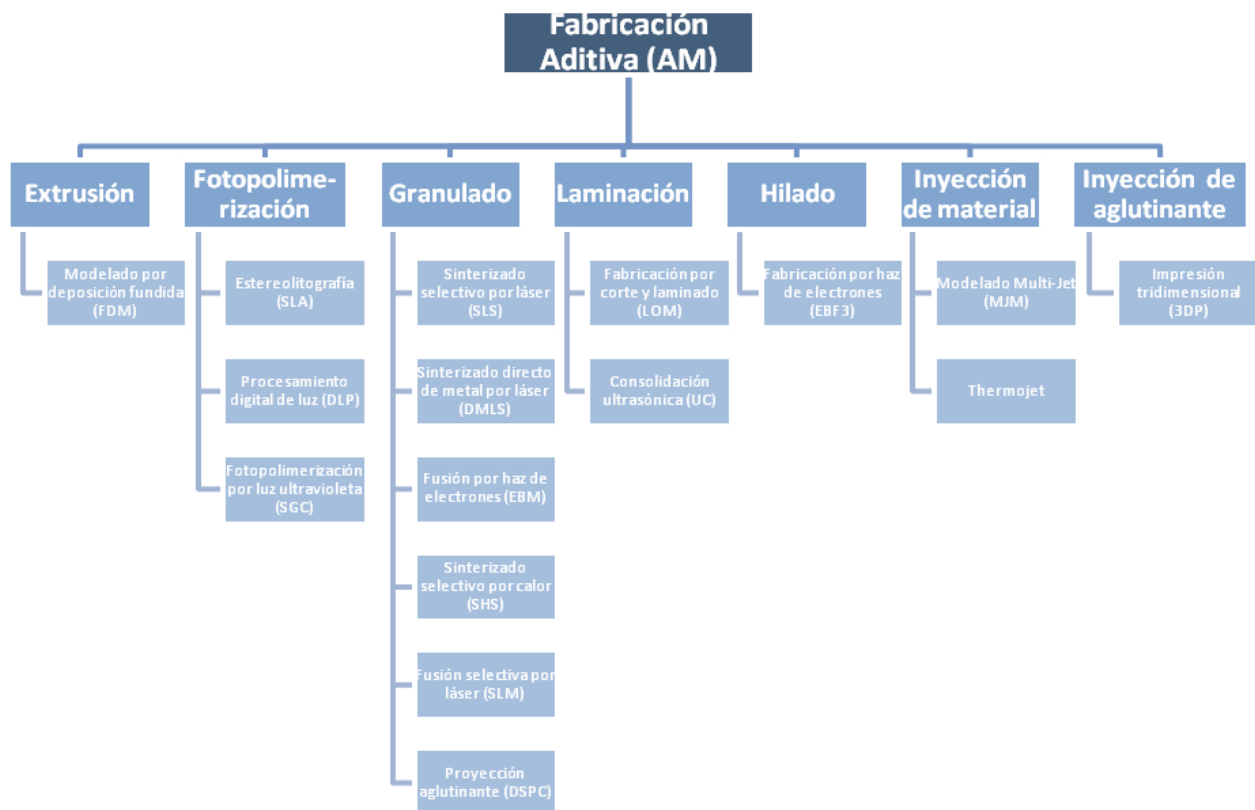


Fig. 2.8. Clasificación de las tecnologías de Fabricación Aditiva.

2.1.3. Materiales para la impresión 3D

Para las tecnologías de impresión 3D que se han mencionado anteriormente se halla una gran variedad de materiales disponibles en el mercado actual. A continuación se presenta una tabla resumen, donde se expone los materiales más empleados.

Tipo	Tecnología	Materiales
Extrusión	FDM	Termoplásticos (ABS, PLA, nylon, policarbonato...), aleaciones eutécticas de metales, materiales comestibles
Fotopolimerización	SLA	Fotopolímero (Termoplásticos: elastómeros)
	DLP	Resina líquida
	SGC	Fotopolímero
Granulado	SLS	Termoplásticos (nylon, poliamida, poliestireno...), polvos metálicos, polvos cerámicos
	DMLS	Casi cualquier aleación y metales no ferrosos (aluminio, titanio, cromo...)
	EBM	Aleaciones de titanio
	SHS	Polvo termoplástico
	SLM	Metales
	DSPC	Yeso
Laminación	LOM	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Hilado	EBF3	Metales y sus aleaciones
Inyección de material	MJF	Termoplásticos (poliamida)
	Thermojet	Cerámicos
Inyección de aglutinante	3DP	Metales, polvos cerámicos y poliméricos

Tabla 2.1. Materiales empleados en los diferentes métodos de impresión.

En la mayoría de las impresoras de carácter doméstico o de sobremesa, los usuarios utilizan dos materiales en particular: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y Poliácido láctico (PLA).

- ABS:** compuesto por tres componentes, tal y como su nombre indica, los cuales aportan características diversas, como son la dureza, rigidez, resistencia al impacto, estabilidad a altas temperaturas y tenacidad a bajas temperaturas. Puede ser mecanizado: pulido, lijado, taladrado; recubierto con otros materiales con facilidad y pegado con acetona. Emite gases nocivos, por lo que la máquina de impresión debe situarse en lugares con ventilación. Es sensible a la exposición de rayos ultravioletas.
Dada la elevada temperatura a la que se extruye, la impresión debe realizarse sobre una superficie suficientemente caliente para evitar que el material se deforme al enfriarse.
- PLA:** plástico biodegradable, además de reciclable, cosa que hace posible su reutilización. En comparación con el ABS, el PLA es más frágil y menos resistente a altas temperaturas. La superficie de extrusión no debe estar sometida a temperaturas tan elevadas, de manera que se reduce la deformación en el proceso de enfriamiento. El post-proceso resulta más complicado.

2.1.4. Impresoras 3D

Actualmente existe gran diversidad de impresoras 3D en el mercado, tanto de uso doméstico como profesional, las cuales pueden distinguirse, principalmente, por los usuarios que las utilizan: particulares o empresas. No obstante, no es la única clasificación utilizada para la distinción de tipos de impresora 3D, ya que también se categorizan según el material con el que se realiza la impresión, la aplicación, la velocidad de impresión, de entre otras características.

- **Impresoras hobby:** la tendencia a acercar la impresión 3D, en cuanto a recursos y avances tecnológicos, al usuario no especializado es cada vez mayor. Derivado en parte del fenómeno *Open Source* (Recurso Abierto), que permite compartir información y recursos, generalmente a través de internet y redes sociales, sin ánimo de lucro, de manera que cualquier interesado pueda beneficiarse de la distribución de conocimiento ligado a esta tecnología. Es decir, se proporciona gran cantidad de información de libre acceso y gratuita. De este modo, no es extraña la llegada de este concepto en el ámbito doméstico, para cualquier usuario que tengan como afición la tecnología de impresión 3D.

Uno de los proyectos que ha hecho posible la creación de impresoras intuitivas y manejables de sobremesa es *RepRap*. Ofrece kits de impresoras autorreplicables que incluyen: instrucciones, piezas, cables, electrónica y herramientas para su montaje. Aunque también da la posibilidad de adquirir la máquina ya montada.



Fig. 2.9. Impresoras tipo hobby: Prusia i3 [3] y BCN3D Sigma R19. Fuente:

<https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/>

- **Impresoras industriales:** tienen un tamaño mayor y su precio también es más elevado, debido a que ofrecen una mayor precisión, robustez y fiabilidad con respecto a las domésticas. Estos parámetros son los que afectan a la respetabilidad de los procesos e impresiones, lo cual es importante dentro del ámbito industrial, ya que se busca la estandarización de los procesos y la disminución de su mantenimiento.

Inicialmente, estaban destinadas a la investigación y al diseño de prototipos rápidos con acabados físico-mecánicos similares al productor final. Sin embargo, gracias al progreso de esta tecnología en el mundo automovilístico, del mecanizado, de la medicina, de la alimentación..., se ha logrado fabricar productos finales de mayor volumen, con menor restricción de materiales y con acabados de alto detalle. Además, el hecho de contar con un software personalizado en la mayoría de ocasiones, el proceso de fabricación supone un ahorro de tiempo y dinero, con menor índice de errores que los procesos convencionales.



Fig. 2.10. Impresoras 3D industriales para metal (ProX DMP) y para plástico (ProX SLS 6100), respectivamente.

Fuente: <https://es.3dsystems.com/>



Fig. 2.11. Impresoras 3D industriales para odontología (DMP Dental 100) y para fundición de metal (ProJet MJP 2500 IC), respectivamente. Fuente: <https://es.3dsystems.com/>

2.2. Impresión 3D en la construcción

Existe un término similar al empleado para designar a la fabricación aditiva, que encaja en el ámbito de la edificación y que se denomina construcción aditiva. Se define como el proceso de unir materiales para crear construcciones a partir de un modelo digital en 3D.

2.2.1. Antecedentes de la impresión 3D en la construcción

Desde hace poco tiempo atrás ha habido varios intentos de implementar la impresión 3D en la industria de la edificación.

En 1998, Hinczewski y otros, usaron la SLA para crear piezas cerámicas en 3D. Posteriormente, Khoshnevis y otros, en 2001, utilizaron el método *Contour Crafting*, con el que demostraron que se podía producir una pieza de yeso, siempre y cuando se adoptara el secado forzado por calentamiento. Pero no es hasta el 2012 que Lim muestra que es posible la impresión de componentes de hormigón prefabricado, con su impresora de 5,4 m (largo) x 4,4 m (ancho) x 5,4 m (altura) de impresión.

En cuanto a modelos arquitectónicos, Gibson y otros en 2002, emplearon las tecnologías FDM y SLS para fabricar algunos modelos en un tiempo significativamente bajo. Ese mismo año, se usó la tecnología de *Concept Modelling* (Modelado de Conceptos) del estudio de Ryder para producir modelos arquitectónicos de baja precisión. Más adelante, se mejoró la precisión de tecnologías como la de FDM, SLS y SLA, dentro del campo de la construcción, con respecto al *Concept Modelling*. A pesar de la mejora, estudios realizados, por ejemplo, en 2006 por Dimitrova determinaron que era realmente difícil reproducir detalles ornamentales y estructuras ornamentales con 3DP. Esto último ha quedado solventado con el paso de los años, ya que se ha alcanzado una precisión de μm , por ejemplo, en ingeniería médica. Es por ello que Melchels y otros (2010) anunciaron que la Estereolitografía ofrecía resultados con mucha precisión en este ámbito.

Era difícil pensar, por aquel entonces, que con el tamaño de las impresoras 3D que se estaban comercializando se podía llegar a construir un edificio, teniendo en cuenta sus dimensiones. Sin embargo, se ha ido cubriendo esta necesidad en los últimos años con algunos proyectos. DUS Architects, empresa holandesa, desarrolla en 2013 la impresora *KamerMaker* de 6 m de altura, la cual trabaja con polipropileno.

En 2014, la empresa arquitectónica china Winsun imprimió en Shangai varias casas completas en menos de 24 horas. Su impresora le permitió levantar edificios enteros usando como material cemento y fibra de vidrio de alta calidad. Gracias a este último componente, los edificios eran dotados de mayor resistencia que los de hormigón reforzado.

La tecnología Qindao Unique, en el mismo año, también creó una impresora basada en FDM de dimensiones 12 m x 12 m x 12 m, pero en su caso utilizaba plástico reforzado con vidrio. En 2015, Winsun imprimió una villa y un edificio de apartamentos de cinco pisos con la tecnología 3DP. Se imprimió por partes, es decir, cada componente era imprimido y se trasladaba al lugar de construcción para instalarlo. Aunque no fuera una impresión directa de las estructuras enteras, quedó demostrada la aplicabilidad de la impresión 3D en los proyectos de edificios completos [14].

Actualmente, la impresión 3D avanza en todos los frentes y surgen más sistemas, materiales, aplicaciones, servicios y accesorios.

2.2.2. Tecnologías de la impresión 3D en la construcción

El estudio y conocimiento de las tecnologías existentes ha permitido, a la industria de la construcción y de la arquitectura, desarrollar nuevos métodos de fabricación aditiva que admita obtener elementos a gran escala, de hormigón u otros materiales para la construcción, a partir de la impresión en 3D.

Aunque la implementación de estos nuevos métodos se encuentra en fase preliminar, destacan 3 tecnologías diferentes, denominadas *Contour Crafting*, *D-Shape* y *Concrete Printing*, que han permitido pasar a la macroescala.

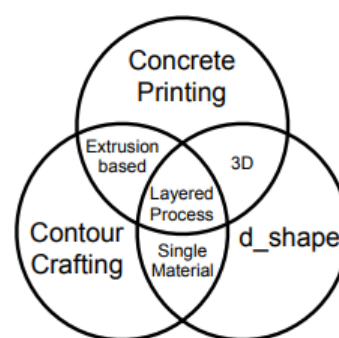


Fig. 2.12. Similitudes y diferencias entre tecnologías [9].

- **Contour Crafting:** tecnología desarrollada por Dr. Behrokh Khoshnevis de la Universidad del Sur de California. Fabrica por capas, expulsando el material mediante boquillas de extrusión, las cuales disponen de dos paletas planas, verticales y sólidas, para crear superficies exteriores suaves y precisas, a medida que el material se deposita.

El conjunto de la boquilla debe disponer de tres componentes de control de movimiento: extrusión, rotación y desviación de la paleta. Las máquinas que utiliza son pórticos XYZ que se mueven en dos pistas paralelas, instaladas en el sitio de la construcción. Éstas necesitan de un sistema de control de movimiento de seis ejes para coordinar las posiciones.



Fig. 2.13. Tecnología Contour Crafting [13].

Durante el proceso existen dos fases diferenciadas: la de extrusión de los bordes exteriores de la construcción y la de llenado del núcleo. Como son dos etapas distintas es posible emplear materiales diferentes, según las necesidades.

La adición de refuerzo como mallas de acero o fibras de plásticos reforzados, es posible de

manera automatizada, durante la fase de llenado [11].



Fig. 2.14. Proceso constructivo Contour Crafting [13].

- **Concrete Printing:** método basado en la extrusión, desarrollado por el equipo de impresión de hormigón de la Universidad de *Loughborough*. Su resolución de deposición es menor que el de *Contour Crafting*, lo que se deduce en un mayor control de geometrías complicadas [10]. Es decir, tiene más versatilidad en cuanto a formas y dimensiones, pero sus acabados son menos precisos.

Por los tamaños de impresión que permite, su capacidad se reduce en la fabricación de componentes de hormigón prefabricado, tales como columnas y muros.



Fig. 2.15. Tecnología 3D Concrete Printing. Fuente: <http://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp/>

- **D-Shape:** Enrico Dini es el fundador e inventor de este método basado en la deposición selectiva de polvo, añadiendo aglutinante para que las capas de impresión se endurezcan. Cada capa de material de construcción (arena, grava o cualquier otra mezcla), del espesor uniforme deseado, se coloca y se compacta. Luego las múltiples boquillas, situadas en serie sobre un pórtico, inyectan el aglomerante en aquellas zonas en que la pieza deba ser sólida, capa por capa. Una vez terminada la pieza, el polvo que no ha sido endurecido y ha hecho la función de soporte se retira y se recicla para la posterior impresión.



Fig. 2.16. Construcción realizada mediante tecnología D-Shape [8].



Fig. 2.17. Tecnología D-Shape [8].

También, durante el proceso de estratificación, se puede parar y agregar refuerzos horizontales, como barras y redes, para dar fuerza a los techos. El valor de curado de una noche será suficiente para comenzar la fase de acabado en la estructura recién impresa [8].

En los tres métodos, los materiales utilizados se endurecen gracias a un proceso de curado y la profundidad de la capa de impresión es contraria a la velocidad de ejecución, es decir, al número de capas necesarias para alcanzar la altura deseada.

2.2.3. Tecnologías de la impresión 3D en la construcción

La investigación de nuevos materiales está a la orden del día y son numerosos los centros y empresas que están ampliando el abanico de posibilidades con productos como textiles, tejidos nerviosos, madera, piedra, alimentos, cemento.

Como el material más utilizado en la construcción es el hormigón, la mayoría de empresas han optado por analizar sus características y adaptarlo a las nuevas tecnologías de impresión, entre las que destaca la construcción aditiva.

En el caso de la **impresión por extrusión** se persigue una serie de objetivos, los cuales pueden llegar a ser contradictorios entre sí. Esto supone una dificultad añadida, teniendo que encontrar el equilibrio pertinente entre todos ellos. Por ejemplo, se desea maximizar la resistencia a la compresión, que implica minimizar la relación agua-cemento, pero manteniendo un contenido de agua suficiente para garantizar la trabajabilidad adecuada del hormigón (capacidad de ser bombeado). Además, la mezcla debe ser fluida (capacidad de ser impreso). Sin embargo, es necesario que después de verterla pueda sostenerse a sí misma y a las capas superiores sin ser deformada (constructividad del material). Por último, durante el vertido, la mezcla debe fijarse rápidamente, pero no excesivamente para asegurar una unión apropiada con la capa inmediatamente superior [7].

Por tanto, es de vital importancia controlar los tiempos de fraguado de las mezclas, la resistencia inicial, la consistencia y la viscosidad.

Manteniendo como referencia a las tres tecnologías más destacadas y anteriormente explicadas, podemos detallar algunas características de los tipos de hormigón empleados por éstas, aunque el secreto comercial impide desvelar detalles técnicos de elevada importancia.


- **Contour Crafting:** extrusión de una mezcla de mortero óptima, compuesta de cemento, arena y agua. A esta mezcla se le añade un plastificante para dotarla de mayor trabajabilidad. Experimentos realizados por el equipo de investigación han determinado una resistencia a la compresión de $18,89 \text{ N/mm}^2$ después de unas horas de curado. La boquilla es pequeña por lo que el diámetro de árido es reducido [12].
- **Concrete Printing:** ha creado un mortero a base de cemento de alto rendimiento, con un 54% de arena, 10% de agua y 36% de compuestos de cemento reactivos. Los componentes tienen una alta resistencia a la compresión de hasta 100 MPa y una resistencia a la tracción inherente de 10 MPa. Se le añade un superplastificante (Viscocrete) para aumentar la trabajabilidad, un acelerador para asentarla con mayor rapidez y un retardador para evitar que asiente demasiado pronto en el tanque [10].

En el caso de la impresión **similar al método de la Estereolitografía:**

- **D-Shape:** puede usar prácticamente cualquier material granular, es decir, arena, grava, agregados reciclados, corcho, caucho. Como condición, el aglomerante depositado sobre él debe ser capaz de unir los granos entre sí.

Las características típicas del material más estudiado por *D-Shape*, el hormigón de cemento Portland 32,5R con arena gruesa, que le da una apariencia de piedra a sus construcciones, tiene las características mostradas en la *Fig. 2.18*. [8].

Material properties	Test method	
Compressive strenght		
-Ortogonal to the layers	UNI EN ISO 12390-3	37,28 MPa
-Parallel to the layers		33,78 MPa
Tensile strenght		
-Ortogonal to the layers	-	3,35 MPa
-Parallel to the layers		3,15 MPa
Density		2150 kg/m ³
Elastic modulus		
-Ortogonal to the layers	-	2000 MPa
-Parallel to the layers		4000 MPa
Porosity	Digital Image Analysis	2,50 %
Aggregates binding ratio	-	50 - 60 %
Mecanical failure compared to standard UNI EN 12390-3		






Fig. 2.18. Propiedades del material empleado por la empresa D-Shape [8].

	Contour Crafting	Concrete Printing	D-Shape
Tipo de Proceso	Extrusión	Extrusión	Impresión 3D
Materiales	Material Cementoso	Material Cementoso	Material granular
Molde	Si, en la boquilla	No	No
Núm. Boquillas	1	1	6-300
Diámetro Boquilla	15 mm	6-20 mm	-
Grosor de Capa	13 mm	6-25 mm	5-10 mm
Adición de Refuerzo	Si	Si	No
Altura de Impresión	Hasta 6 m	Hasta 4 m	Hasta 10 m
Superficie de Impresión	-	Hasta 11 x 5 m	Hasta 12 x12 m

Tabla 2.2. Comparativa entre tecnologías de impresión en el ámbito de la macroescala.

Dentro del ámbito de la construcción, ya hay varias entidades que han realizado impresiones con hormigón u otros materiales, siguiendo los pasos de las tres tecnologías principales. Algunos ejemplos de empresas que han fabricado elementos constructivos son:

- *World's Advanced Saving Project (WASP)*: Uno de los materiales con el que han construido ha sido el hormigón fabricado a partir de cemento y otros elementos aglutinantes, tales como arcilla o geopolímeros². También ha empleado adobe, mezclando arcilla, arena y paja. En ocasiones, simplemente ha utilizado arcilla como material de extrusión.
- *WinSun Decoration Design Engineering Co.*: ha creado varios materiales nuevos que utilizan la tecnología de impresión 3D. GRG, panel de yeso reforzado con fibra de vidrio especial; SRC, cemento reforzado con fibra de vidrio especial; FRP, un material compuesto de fibra de vidrio especial; y piedra natural [15].
- *COBOD*: imprime con morteros con un tamaño de partículas menor a 8 mm y hormigón, de hasta 8-12 mm. La cantidad de cemento en la mezcla ronda los 30-35%, lo cual proporciona 20 minutos para no perder la adherencia necesaria, antes de tener que imprimir la siguiente capa. Además, a la mezcla se le añade grava y baldosas recicladas, obteniendo una resistencia a compresión de 52 MPa [18].
Alcanza una resistencia a la compresión de 30 MPa y una resistencia a la flexión de 5 MPa en 28 días [16].
- *Apis Cor*: la empresa utiliza el *geocement* creado por la compañía Geobeton. Se trata de una mezcla basada en cemento de geopolímero en forma de polvo seco y en reactivo líquido-geosilicato. Tiene una alta resistencia a ácidos y medios corrosivos, resistencia a altas (por encima de los 1000°C) y bajas temperaturas, tiene propiedades de aislamiento y presenta fluidez y tixotropía. Su resistencia a compresión es superior a 100 MPa y a flexión, superior a 13 MPa [17].

² **Geopolímero**: polímero sintético inorgánico de aluminio-silicato. Se suele utilizar como sustitutivo de cementos Portland.

- *Universidad de Tecnología de Eindhoven (TU/e)*, *3DCP*: la empresa SG Weber Beamix desarrolla para la universidad holandesa un mortero de composición específica. Está formado por cemento Portland 52,5R, un agregado silíceo, un relleno de piedra caliza y aditivos específicos para el bombeo del material, fibras de polipropileno para reducir las grietas durante el secado y modificadores reológicos³ para obtener un comportamiento tixotrópico⁴.

2.2.4. Impresora 3D para la construcción

A partir de *Contour Crafting* del Dr. Behrokh Khoshnevis, a mediados de 1990 en California, empezó a crecer el estudio de la impresión 3D en el campo de la edificación/arquitectura de forma más o menos lineal. Desde entonces se han investigado varios dominios de aplicación como: construcción de edificios de uso público o privado, construcciones artísticas, construcciones urbanas (por ejemplo, puentes peatonales) y construcciones arquitectónicas; que han provocado un crecimiento exponencial a partir de 2012.

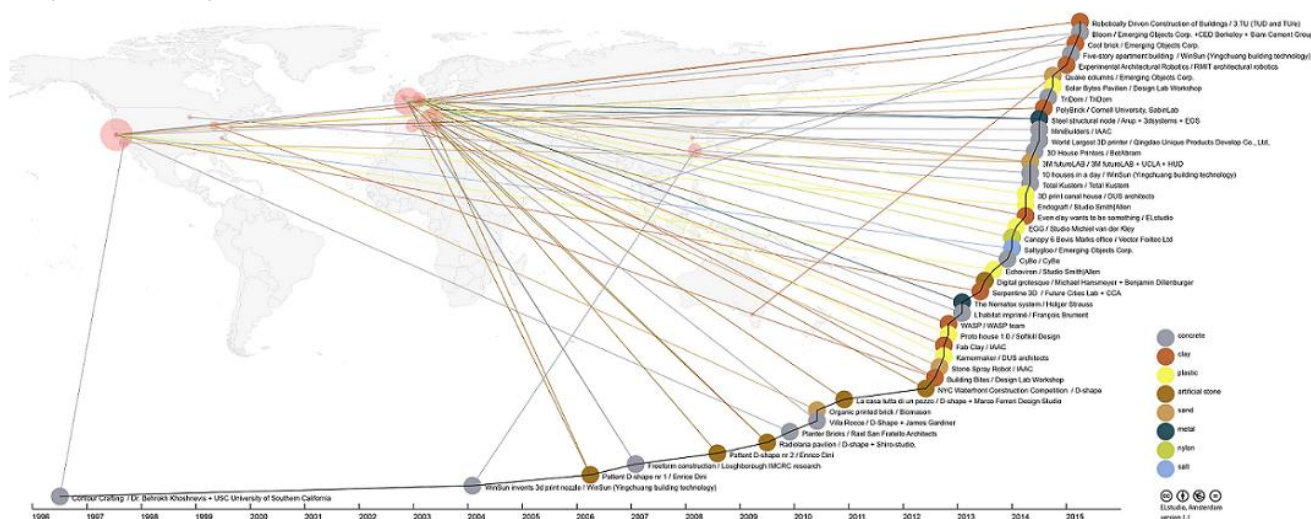


Fig. 2.19. 23 años de desarrollo de la impresión 3D, dentro del sector de la arquitectura. Fuente: <https://3dprint.com/222125/contour-crafting-dod-contract/>

Henrik Lund-Nielsen, de la asociación *3D Construction Printing*, expone prácticamente todos los proyectos para la impresión de construcción en 3D presentes en el mundo, en una conferencia el 30 de Noviembre de 2017. Determina un total de 66 proyectos: 34 en Europa; 17 en Estados Unidos, la parte norte y sur de América; y 15 en Asia, incluyendo Rusia y Australia dentro del recuento. Europa lidera en cuanto a número de proyectos desarrollados, así como en colaboración entre instituciones educativas y empresas. Si bien, pierde puestos en términos de realización de esos proyectos desarrollados.

³ **Reología:** rama de la física de medios continuos que estudia la deformación y el flujo de la materia como, por ejemplo, la viscosidad, plasticidad, elasticidad...

⁴ **Fluido tixotrópico:** fluido que cambia la viscosidad con el tiempo bajo la acción de un esfuerzo. Son ejemplos, las pinturas y gelatinas.

Contrariamente, Asia obtiene el primer puesto en proyectos llevados a cabo, por la gran cantidad de edificios construidos con esta tecnología. Pero destaca su falta de participación en la dotación de información y recursos, tanto académicos como industriales.

Finalmente, Estados Unidos no aparenta alcanzar un avance progresivo. Básicamente se debe a la poca colaboración de la industria de la construcción convencional, pero también a los inconvenientes en obtener patentes o hacer frente a cuestiones legales.

Algunas de estas empresas e instituciones que han demostrado el avance acaecido en la impresión 3D son:

- Empresa china *Winsun Decoration Design Engineering Co.* en 2014 en Shangai, imprime un conjunto de 10 casas con una impresora de tamaño 32 m (longitud) x 10 m (ancho) x 6,6 m (altura) la cual se basa en la tecnología FDM. En 2015, finaliza los proyectos de un edificio de apartamentos de 5 pisos y de una villa de 1100 m² en Suzhou, China. Más adelante, imprime un edificio de oficinas en Dubai, UAE, de 250 m².



Fig. 2.20. Edificio de apartamentos, villa en China, oficinas en Dubai y conjunto de casas en Shangai, mostrado de izquierda a derecha y de arriba a abajo [16].

La empresa china no ha desvelado las particularidades de su impresora con estructura de pórtico.

- Andrey Rudenko dueño de *Total Kustom*, en Septiembre de 2015, hace el interior de una suite en el Lewis Grand Hotel de 12,5 m x 10,5 m x 4 m en Filipinas, la cual incluye dos dormitorios, una sala de estar y una sala con jacuzzi. Pero un año antes, construye un castillo para niños en Minnesota, EE.UU.

La impresora 3D recibe el nombre de Strybot2. Tras la verificación de información sobre ella, se conoce que la estructura es tipo pórtico pero no se han podido detallar sus características.



Fig. 2.21. Suite del Lewis Gran Hotel en Filipinas. Fuente: <http://www.totalkustom.com/>



Fig. 2.22. Castillo impreso en Minnesota, EE.UU, e impresora Strybot2. Fuente: <http://www.totalkustom.com/>

- Universidad de Tecnología de Eindhoven (TU/e), adoptando la tecnología *Contour Crafting*, crea la instalación 3DCP. El hormigón mezclado con agua es bombeado por un mezclador-bomba a través de una manguera conectada en el cabezal, el cual está situado en el brazo vertical de la impresora pórtico de 4 ejes con un lecho de impresión de 9 m x 4,5 m x 3 m. La impresora fue construida por la compañía holandesa ROHACO.

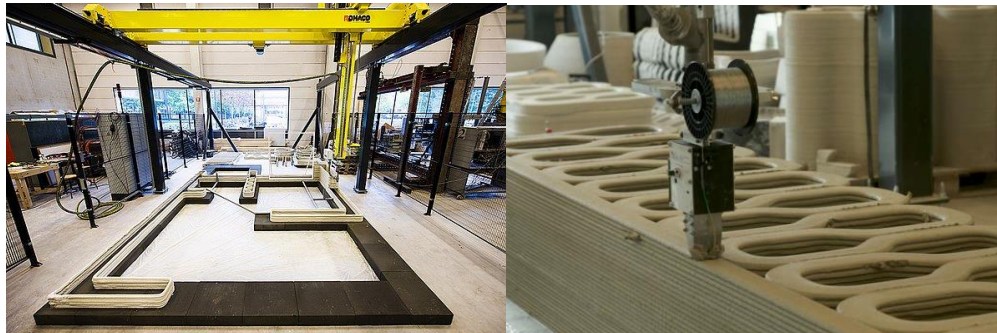


Fig. 2.23. Impresora de TU/e, 3DCP. Fuente: <https://3dprintedhouse.nl/en/>

Actualmente tienen el proyecto *Milestone* abierto, que consiste en edificar 5 casas de hormigón en Holanda, a entregar en 2019. Las viviendas tendrán un estilo modernista, simulando ser rocas en dentro del distrito Meerhoven de Eindhoven.



Fig. 2.24. Proyecto Milestone de TU/e. Fuente: <https://3dprintedhouse.nl/en/>

- *DUS Architects*, con sede en Amsterdam, fabrica en 2013 una casa de canal de polipropileno con la impresora *KamerMaker* de 6m de altura, basada en la tecnología FDM. Puede imprimir componentes con dimensiones de hasta 2,2 m x 2,2 m x 3,5 m.

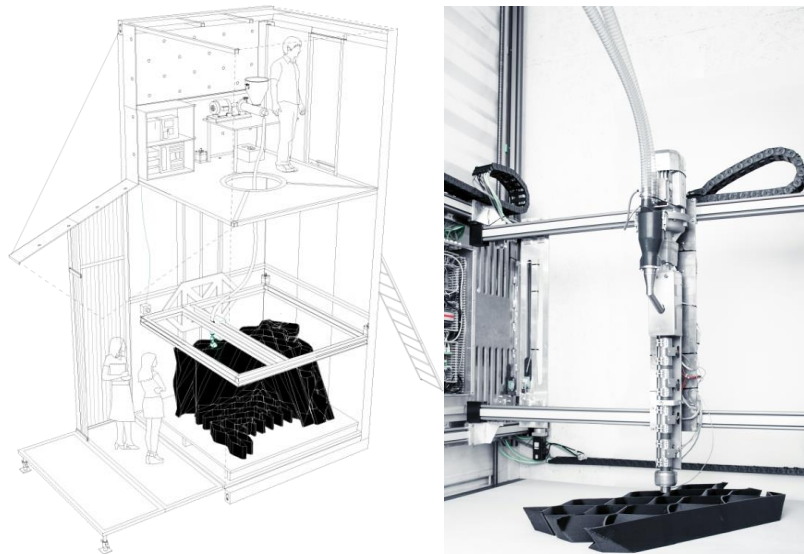


Fig. 2.25. Impresora KamerMaker de DUS Architects. Fuente: <http://houseofdus.com/#section-manifesto>

- La compañía *Apis Cor* imprime, de forma automatizada, las paredes autoportantes, los tabiques y la envolvente (es decir, no incluye la impresión del techo, la colocación de ventanas, el pintado, la carpintería...) de un edificio de 38 m² en Stupino Town, Moscú, en solo 24h. Para ello, emplea un brazo robótico extensible de dimensiones 4 m x 1,6 m x 1,5 m y 20.000 N de peso, con un área de impresión de 132 m². Es fácil de transportar y no necesita de un preparado previo a la edificación, porque consta de un sistema de estabilización propio.



Fig. 2.26. Impresora de la compañía Apis Cor [1].

- WASP es un fabricante italiano con sede en Massa Lombarda que ha desarrollado la impresora BigDelta de 12 m de altura y 7 m de ancho, la cual funciona con energía solar y trabaja con agua, fibra vegetal y tierra. Su carga máxima es de 2.000 N, pero se sugiere emplear cargas de 400-500 N para reducir vibraciones.

La estructura producida tiene forma circular hueca con 6 m de diámetro y 4 m de altura como máximo, sin techo. Éste debe ser añadido posteriormente al armazón, según la ubicación de la construcción.

Está inspirada en los principios de la *DeltaMaker*, una impresora doméstica, que a su vez se asemeja a un Robot Delta.



Fig. 2.27. Impresora BigDelta de WASP. Fuente: <https://www.3dwasp.com/>

En 2018, evolucionan su anterior impresora a la actual *Crane WASP-The infinity 3D Printer*, que se compone de una unidad de impresora principal que puede ensamblarse en diferentes configuraciones y es sencilla de transportar. La capacidad de impresión del módulo individual es de 6,6 m de diámetro y 3 m de altura, pero si se unen varias impresoras de este tipo, es posible aumentar el volumen de trabajo.

Puede imprimir diversos materiales como, por ejemplo, cemento, geopolímeros, materiales basados en la tierra...

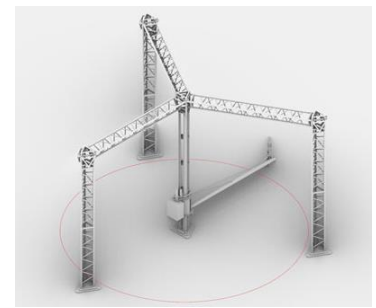


Fig. 2.28. Nueva impresora Crane WASP-The Infinity 3D Printer.

Fuente: <https://www.3dwasp.com/>

- *3D Printhuset* funda COBOD y en 2017 imprimen el primer edificio en Europa llamado The BOD (*Building On Demand*; edificio bajo demanda). Realizando mejoras en la impresora original BOD, llevan al mercado la impresora BOD2. Esta última está basada en un pórtico modular de 3 ejes, construido a partir de módulos de 2,5 m, adaptables según las especificaciones que requiera el cliente.



Fig. 2.29. The BOD [18].

Con únicamente 2 o 3 persona, la impresora puede desmontarse y trasladarse con la ayuda de un camión.

Aunque el mismo cabezal tiene un almacenamiento pequeño de material, de entorno a los 200-300 N, la impresora tiene una bomba que la alimenta con un flujo continuo cuando detecta que la tolva está vacía.



Fig. 2.30. Impresora BOD2-353 de COBOD. Fuente:

<http://cobod.com/bod2/>

- En 2017, *Cazza Constructions* con sede en Estados Unidos da a conocer pequeños detalles de su impresora CazzaX1, basada en la tecnología por extrusión (FFF, FDM...). Se trata de un brazo robot con dimensiones de construcción de 3,6 m x 3,4 m x 0,8 m, al cual se le puede añadir un extensor frontal para llegar a los 4,7 m y otro extensor de altura, para alcanzar los 5,5 m. La estructura está reforzada de plástico o fibra de carbono para hacer frente a los contratiempos ambientales. Utiliza el hormigón como material de impresión.



Fig. 2.31. Impresora CazzaX1. Fuente: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/cazza-x1/>

- *Constructions 3D* con sede en Valenciennes, Francia, consta de cuatro socios creadores de la impresora 3D Constructor, la cual es una grúa elevadora hidráulica modificada para ser controlada numéricamente. Ofrece un área de impresión de 18 m de diámetro y 10 m de altura. Imprime con materiales como hormigones, cerámicas, morteros, arcillas y otros materiales compatibles.

La estructura plegada ocupa 0,85 m x 1,95 m x 3,2 m, por lo que es fácil transportarla.



Fig. 2.32. Impresora 3D Constructor. Fuente: <https://www.constructions-3d.com/technical-data>

2.2.5. Arquitectura de las impresoras 3D para la construcción

Uno de los mayores retos en la edificación ha sido y es la adaptación de las tecnologías a la construcción aditiva. Para ello ha sido necesario unir el mundo digital con el de la construcción, al mismo tiempo que encontrar las propiedades adecuadas del material a extruir en configuraciones ambientales óptimas.

Aunque algunas soluciones ya se han visto en el apartado anterior, a continuación se presenta las distintas soluciones existentes:

- **Pórtico:** también denominadas *gantry*, suelen ser de 3 o 4 ejes. Como se ha visto, esta solución presenta un cabezal que se desplaza a lo largo de los ejes cartesianos X, Y y Z. La impresión se produce dentro de los límites de la estructura.

Las tecnologías *Concrete Printing* y *Contour Crafting* se basan en la estructura pórtico y constan de un sistema de control por CNC⁵ para ubicar el cabezal en la posición deseada. Por otro lado, *D-Shape* también emplea el pórtico como solución, aunque no funciona con extrusión, sino con un proceso similar a la Esteriolitografía.

Es una construcción estable y segura, así como simple y económica. Sin embargo, tiene poca flexibilidad, dado que ocupa un espacio considerable.

- **Brazos robóticos:** con amplia presencia en la industria automovilística para procesos de pintado o montaje, también se han acondicionado para la extrusión de material. Estos brazos robóticos pueden constituir un mecanismo único o pueden ir acoplados a otros robots, dotando de complejidad a la máquina resultante.



Fig. 2.33. Impresora CyBe RC 3Dp de la empresa CyBe. Fuente: <https://cybe.eu/3d-concrete-printers/>

Simulan el movimiento de un brazo humano con sus articulaciones, permitiendo has 6 grados de libertad o más, gracias a su capacidad de realizar movimientos rotacionales como traslacionales o desplazamientos lineales.

La ventaja está en que es fácil de mover, ya que el sistema mecánico es pequeño. No obstante, su precio es elevado, tiene menor estabilidad y, en caso de no estar montado sobre una plataforma móvil, su área de impresión está limitada.

⁵ **CNC:** sistema de automatización de máquinas, las cuales funcionan mediante comandos programados previamente almacenados.

- **Suspensión por cables:** el robot dispone de una boquilla de deposición, de un depósito de material y motores eléctricos, controlados por CNC, para extender o recoger los cables de manera automatizada. Los cables del robot, tensados por acción de la gravedad, están conectados a puntos estables del entorno, tales como la estructura de un edificio. Esto implica un menor coste de la estructura portante, ya que no precisa de guías lineales.

Permite imprimir grandes elementos constructivos, es fácilmente transportable y su montaje es sencillo. Sin embargo, la mayoría de estos robots tienen algunas limitaciones con los cables, ya que interfieren entre sí y con los objetos de su alrededor.

Hay varias configuraciones:

- Los cables están montados en la parte superior del marco.

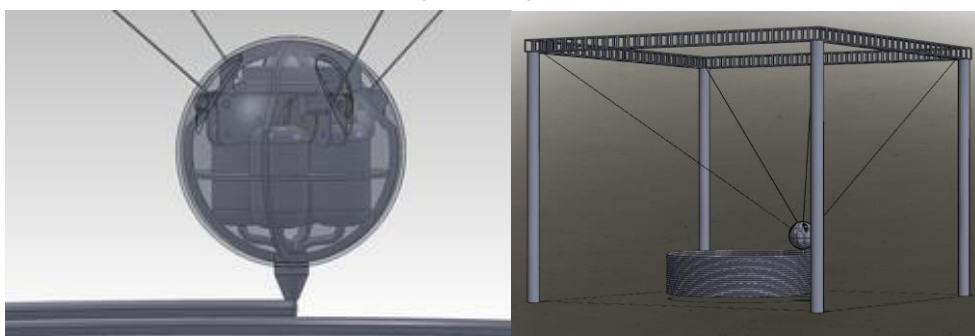


Fig. 2.34. SpiderBot desarrollado por Neri Oxman. Fuente: <http://www.bnnpeters.com/spiderbot.html>

- Los cables están montados desde la base.

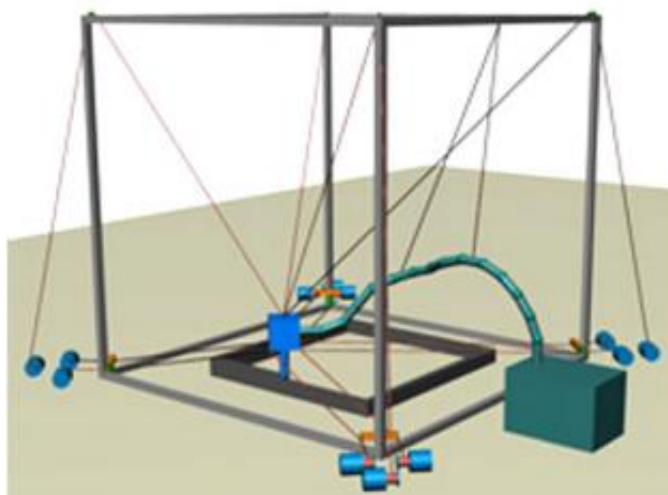


Fig. 2.35. Robot cartesiano de Contour Crafting suspendido por cables, C⁴ Robot [19].

Una solución con ciertas similitudes al sistema de plataforma suspendida por cables es la impresora basada en un robot Delta (Fig. 2.27.). La diferencia radica en que, en lugar de emplear cables, el cabezal cuelga de perfiles ligeros, los cuales restringen la rotación y hacen la función de brazos móviles.

- **Mini-robots:** hay gran variedad de pequeños robots para la impresión destinados a la construcción.

Sasa Jokic y Petr Novikov del Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya, IAAC, crean los MiniBuilders (mini-constructores) que, juntos, pueden imprimir una estructura de cualquier tamaño:

- *Base Robot* (robot base): utiliza el sensor de posicionamiento que tiene implantado en su parte frontal para seguir la línea de la pista sobre la que realizará el movimiento. Se encarga de imprimir las primeras capas para colocar la base de la estructura y así el siguiente robot pueda actuar.



Fig. 2.36. Base Robot de IAAC. Fuente: <https://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-print-structures-of-any-size>

- *Grip Robot* (robot de agarre): se sujeta en las capas creadas con el primer Minibuilder a través de cuatro rodillos conectados cada uno a un actuador que lo posiciona dentro y por encima de la estructura, para continuar completando la estructura básica. La boquilla puede moverse hacia los lados para crear paredes y salientes, horizontales y curvos.

Usa calentadores que aceleran el proceso de curado, así se asegura que el robot va a sostenerse en los salientes.



Fig. 2.37. Grip Robot de IAAC. Fuente: <https://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-print-structures-of-any-size>

- *Vacuum Robot* (robot al vacío): utiliza una ventosa que les permite adherirse a la superficie de la estructura impresa, desplazándose sobre cualquier inclinación, para agregar capas adicionales de material como refuerzo.

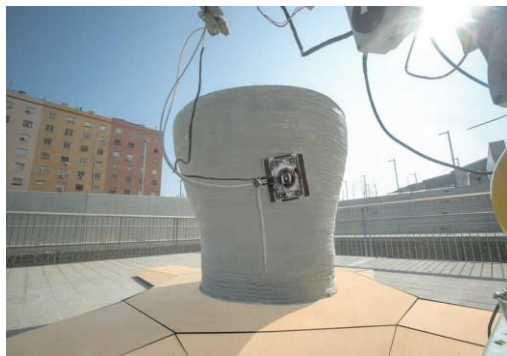


Fig. 2.38. *Vacuum Robot* del IAAC. Fuente: <https://www.autodesk.com/redshift/drone-3d-printer/>

El suministro de material se efectúa mediante tubos que tienen inicio en otro robot, el cual puede seguirlos alrededor de la estructura.

Estos robots en concreto no son de aplicación general para la construcción, sino para un ámbito más especializado. Es decir, para superficies irregulares, para ocasiones en las que no se conoce el terreno en el que se va a imprimir la estructura.

	Pórtico	Brazo Robótico	Suspensión por Cables	Mini-Robots
Piezas Ensambladas	✓		✓	
Piezas con Geometrías Especiales	✓		✓	✓
Estructura Monolíticas	✓	✓		✓

Tabla 2.3. Comparativa de arquitecturas de las impresoras 3D para la construcción.

En definitiva, si se comparan las arquitecturas presentadas, parece obvio que la solución ideal es la que tenga mayor versatilidad constructiva. Es por este motivo que, cuando se pretende construir un edificio completo de la forma más óptima posible, hay dos tecnologías que quedan descartadas desde un inicio.

El brazo robótico depende de la inclusión de una plataforma móvil para aumentar su utilidad. No obstante, la estabilidad sigue siendo menor que la de otras soluciones.

Y, por último, los mini-robots suponen un coste mayor, ya que implica el desarrollo de varios dispositivos para una sola construcción. Además, su uso es específico, dado que no se aconseja para la construcción “tipo”, para la construcción en su vertiente más común.

3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Para el diseño de la impresora 3D se establecen una serie de especificaciones técnicas en relación tanto con la estructura como con la impresión.

En referencia a la estructura se imponen como restricciones el peso y las dimensiones máximas, no sólo de la impresora sino también del lecho de impresión. Determinar estos parámetros permite establecer el volumen de impresión que puede ofrecer la impresora, asegurar un transporte cómodo y ofrecer una instalación sencilla.

Por otro lado, las características que se definen en relación con la impresión son la velocidad de construcción de la vivienda y, por lo tanto, de impresión, las características de su puesta en marcha y el material que va a emplear.

La velocidad mínima que se impone es de 20 m/min, dado que las impresoras que existen actualmente con mayor rapidez de fabricación tienen una velocidad prácticamente igual o mayor a la elegida. El motor que permita alcanzar o sobrepasar esta velocidad deberá ser un servomotor con alimentación controlada trifásica de corriente alterna, por el voltaje que demanda este tipo de motores.

En la industria de la construcción y la arquitectura, el material por excelencia es el hormigón, ya que presenta adaptabilidad de forma, versatilidad y rentabilidad frente a otros materiales desarrollados para el mismo fin. Además, existe la posibilidad de mejorar sus prestaciones incorporando fibras de diferente y variada naturaleza. Por estos motivos, se elige el hormigón como material para llevar a cabo la impresión, la cual se realizará mediante la extrusión del mismo.

El motivo de atribuir estas especificaciones se debe a que la finalidad del proyecto es diseñar la estructura y mecanismo de movimiento de una impresora 3D adecuada para construir una vivienda segura y funcional, optimizando el proceso constructivo respecto al convencional. Las mejoras se obtienen reduciendo tiempos de construcción e instalación sobretodo y garantizando la calidad final del producto imprimido.

Otra restricción es el número de cabezales de extrusión. Se establece el límite en uno a pesar de que no permita imprimir varias partes ni diversos materiales simultáneamente. Todo y con esto, un único cabezal proporciona simplicidad de la impresora, en relación a su ensamblaje y programación, y evita el sobre coste que supone añadir otro cabezal y sus soportes.

Por último, el tiempo de instalación de la totalidad de la estructura de la impresora no puede superar las 72 horas. Se corresponde con el periodo medio calculado a partir de la investigación de tiempos de ensamblaje de estructuras pórtico de similares características como, por ejemplo, grúas pórtico, pórticos portantes, sistemas de manipulación.

A modo de ejemplo, a continuación se detalla las especificaciones de algunas de las impresoras más trascendentes del mercado de la impresión 3D a gran escala, como:

- BigDelta, creada por WASP.
- ApisCor
- BOD2, creada por COBOD.

Impresoras BOD2	
Dimensión exterior	-
Material empleado	Morteros y hormigón
Tecnología de construcción	Pórtico
Volumen máx. de impresión	6,9 x 19,8 x 9,1 m ³
Carga para extrusión	200 - 300 N
Velocidad de impresión	1 m/s
Max. altura	6,9 m
Precio de venta	191.000€ - 416.000€

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas de la impresora BOD2 de COBOD. Fuente: <http://cobod.com/bod2/>

Impresora ApisCor	
Dimensión exterior	4,5 x 1,5 x 1,5 m ³
Material empleado	Geopolímero parecido al hormigón
Tecnología de construcción	Robot cilíndrico
Peso	20.000 N
Máx. Área de operación	132 m ²
Max. altura	3,10 m
Área de impresión	38 m ²
Velocidad de impresión	1 - 10 m/min
Velocidad de ralenti X/ Y	20 m/min
Precisión de posicionamiento	±0,5 mm
Motor de los ejes X / Y / Z	Servomotor
Potencia consumida	8 KW
Tiempo de instalación	30 minutos

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas de la impresora ApisCor [1].

Impresora BigDelta	
Dimensión exterior	12 x 6 x 6 m ³
Material empleado	Adobe (barro y paja), geopolímeros
Tecnología de construcción	Suspensión por cables
Carga para extrusión	0 – 2.000 N, preferible 400 -500 N
Velocidad de impresión	24 m/min
Máx. altura	12 m

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas de la impresora BigDelta de WASP. Fuente: <https://www.3dwasp.com/>

Los valores de las especificaciones señaladas son los siguientes:

DIMENSIONES	
Dimensiones externas máximas de la impresora	20 x 10 x 10 m ³
Área máxima de impresión	170 m ²
Altura máxima de impresión	8 m
Peso máximo impresora	150.000 N
Peso máximo del eje del cabezal extrusor	5.000 N
ESPECIFICACIONES DE IMPRESIÓN	
Mínima velocidad de impresión	20 m/min
Motor de los ejes X / Y / Z	Servomotor
Alimentación	Trifásica alterna
Máxima flexión de la flecha	± 40 mm
Materiales de impresión	Hormigón
Número de cabezales	1
Impresión de Multi-material	No
Tipo de impresión	Extrusión de material
INSTALACIÓN	
Tiempo máximo de instalación	72 horas

Tabla 3.4. Especificaciones de la impresora 3D diseñada.

Al no disponer de datos concretos sobre el coste de fabricación y/o venta de las diversas impresoras estudiadas, así como se ha tenido acceso a los posibles presupuestos, el coste económico no ha sido contemplado como un punto restrictivo.

Tampoco se han considerado otras especificaciones como, por ejemplo, el consumo de la máquina, nivel de ruido, garantías de seguridad u otras, por falta de correspondencia con el alcance de este proyecto.

4. DISEÑO CONCEPTUAL

Antes de detallar la elección de los elementos que constituirán el prototipo de la impresora 3D es de vital importancia conocer cómo funciona la máquina y que componentes son necesarios para ello. Un desglose de las funciones y sub-funciones que puede llegar a alcanzar la impresora permite determinar, para cada una de sus partes, cuál es la alternativa más adecuada.

A continuación, se muestra un análisis funcional que abarca las funciones que se encuentran dentro del alcance del proyecto. De los elementos que pueden formar parte de la impresora, las incluidas en el diseño son:

- Estructura portante
- Motores para el movimiento
- Elementos de transmisión de movimiento
- Soportes y sujeciones

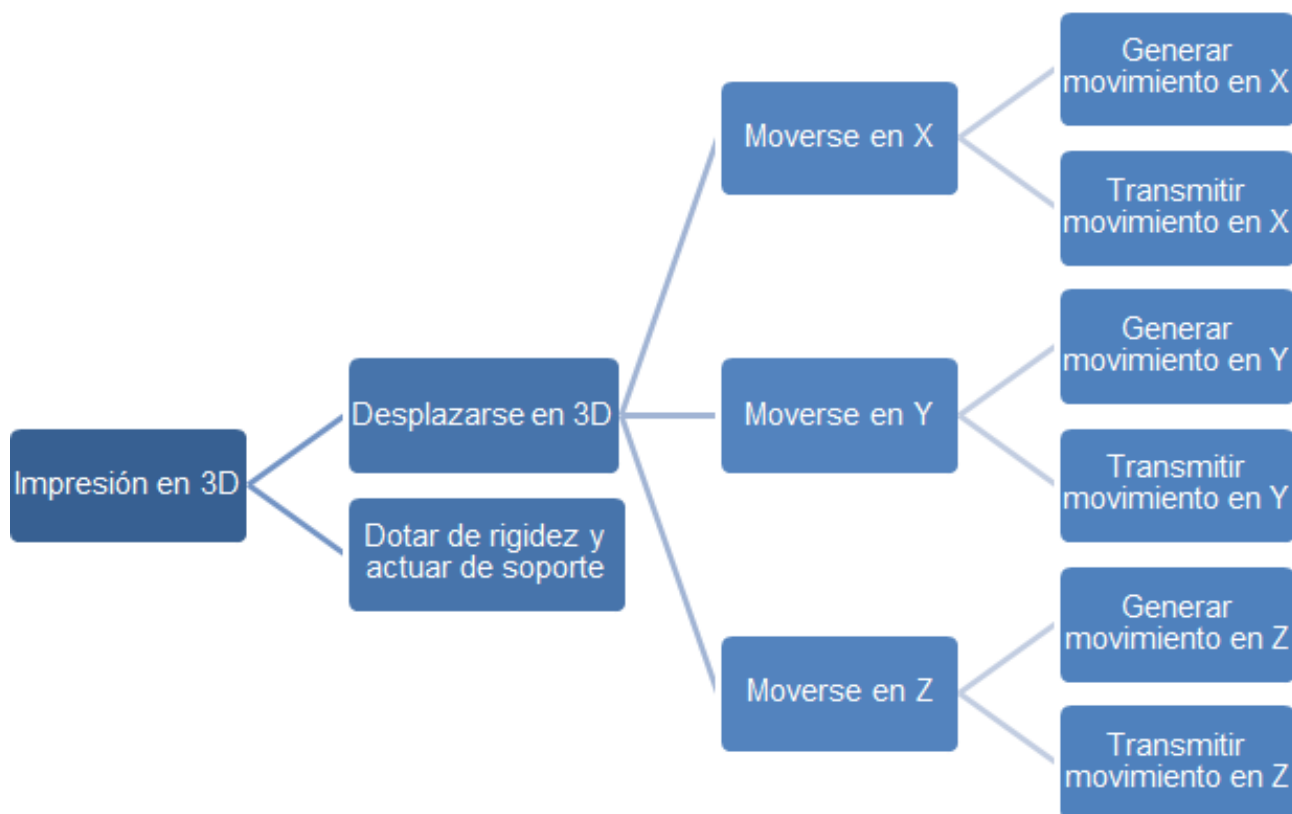
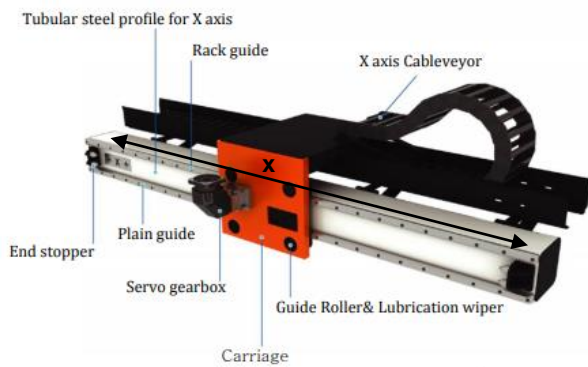


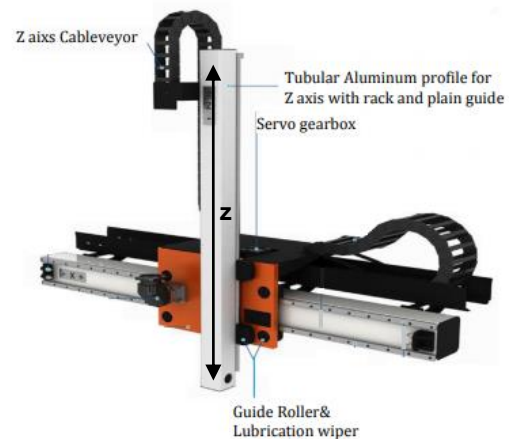
Fig. 4.1. Análisis funcional de la impresora 3D.

Para mostrar de manera más visual cuál podría ser la ubicación de los elementos, se desglosa como ejemplo un robot pórtico de 3 ejes del consorcio de fabricantes coreanos US-Korea Hotlink, fundado por la consultoría LPR Global.



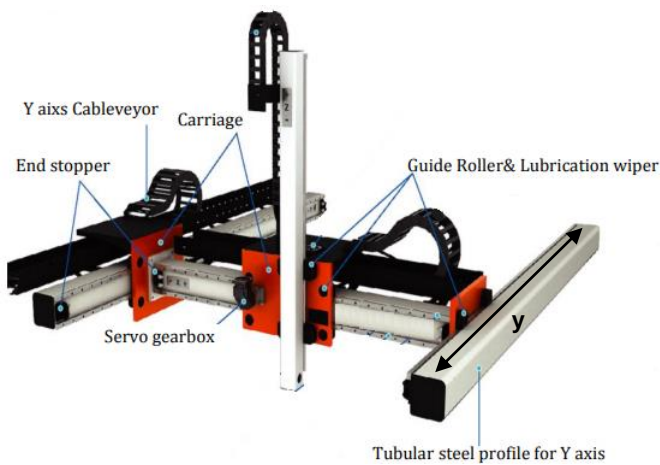
- **Eje X:**

- Perfil del eje X
- Motor del eje X
- Elementos de transmisión del eje X
- Soportes y sujeciones del eje X



- **Eje Z:**

- Perfil del eje Z
- Motor del eje Z
- Elementos de transmisión del eje Z
- Soportes y sujeciones del eje Z



- **Eje Y:**

- Perfiles del eje Y
- Motor del eje Y
- Elementos de transmisión del eje Y
- Soportes y sujeciones del eje Y



- **Estructura:**

- Pilares
- Travesaños
- Uniones

Fig. 4.2. Detalle de las partes de una impresora 3D de gran escala. Fuente de ilustraciones: <https://www.uskoreahotlink.com/products/factory-automation/gantry-robots-rack-and-pinion/>

4.1. Configuración de los ejes

El conjunto estructural de una impresora 3D es el chasis, que consiste en elementos estructurales a lo largo de los ejes en movimiento. Las principales configuraciones de los robots industriales en función de las coordenadas utilizadas son la cartesiana, la cilíndrica, la polar, la SCARA⁶ o la angular.

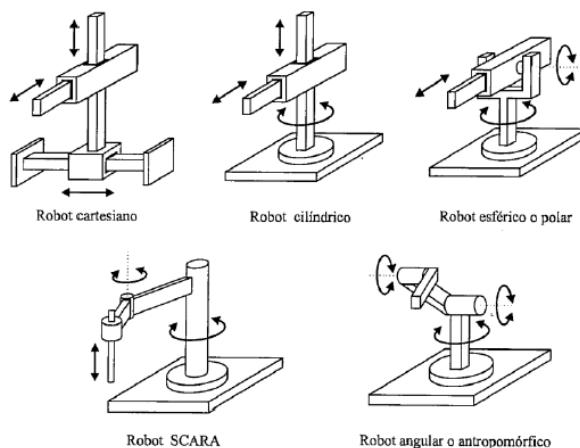


Fig. 4.3. Configuraciones más usuales de los robots industriales. Fuente: <https://www.monografias.com>

Aplicadas a las impresoras 3D de gran tamaño se tienen 5 configuraciones posibles:

- **Arquitectura cartesiana:** estas impresoras reciben este nombre debido al sistema de coordenadas que utilizan para el movimiento, el cartesiano. El movimiento se traduce en tres ejes ortogonales, donde el origen puede variar según la máquina.

Funciona ubicando tres guías correspondientes a cada uno de los ejes X, Y y Z. De esta manera las guías pueden combinar sus movimientos y conseguir ubicar el extrusor en un punto específico dentro del espacio de impresión.

Su facilidad de ajuste, de análisis y corrección de errores, junto la gran cantidad de oferta de proveedores sobre este tipo de estructuras, suponen una enorme ventaja. También se caracteriza por tener un diseño sencillo debido a que el software y los mecanismos son más simples y por disponer de un ratio de volumen de impresión/volumen de la máquina, mejor que las impresoras con arquitectura tipo Delta. Sin embargo, tiene inercias en cada uno de los ejes que pueden acabar afectando a la aceleración.

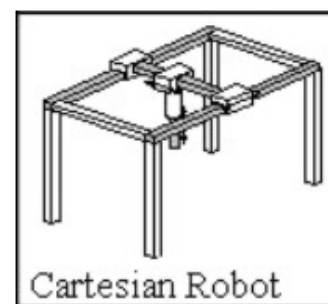


Fig. 4.4. Configuración cartesiana, tipo pórtico. Fuente: <https://docplayer.es/>

⁶ **SCARA:** Selective Compliant Assembly Robot Arm o Selective Compliant Articulated Robot Arm. Robot de cuatro grados de libertad con posicionamiento horizontal.

La arquitectura cartesiana de la impresora 3D puede construirse mediante una estructura en forma de H con 2 o 4 pórticos, obteniendo con esta última opción una mayor estabilidad; o bien, con una estructura rectilínea.

- **Arquitectura Delta:** su mecanismo está formado básicamente por tres elementos.
 - Tres guías verticales que permiten el deslizamiento arriba y abajo, a lo largo del eje Z, dispuestas en configuración triangular.
 - Tres brazos que se acoplan a las guías, lo cuales transmiten el movimiento y posicionan al extrusor.
 - El extrusor está suspendido por encima y se mueve por todo el espacio de impresión en función de la altura que tenga cada brazo, recibiendo el movimiento a través de las guías.

Esta arquitectura permite obtener alta definición si su calibración es la adecuada, así como alta velocidad y aceleración de impresión. Esto último se debe a que la posición en el eje X dependerá de la posición en el eje Z y, por consiguiente, dependerá también del ángulo que formen la guía y el brazo. Es decir, al realizar el cociente entre el espacio recorrido y el tiempo transcurrido, obtenemos una velocidad que aumentará a medida que aumenta el valor del ángulo.

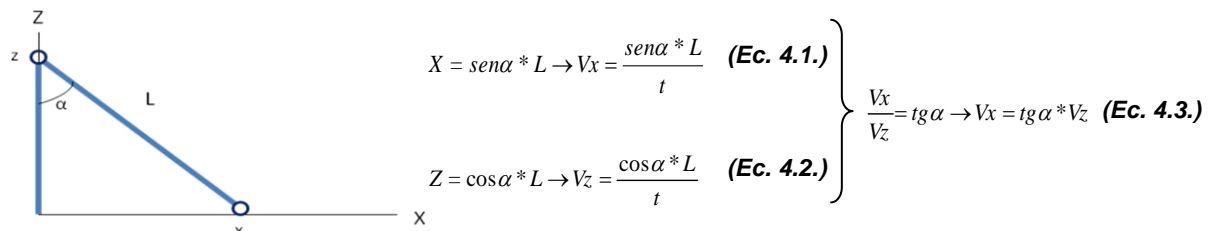


Fig. 4.5. Esquema de la variación de la velocidad en función del ángulo.

También ofrece la posibilidad de incrementar la altura de fabricación sin mermar la calidad de ésta. Dicha altura la hace eficiente en cuanto a la ocupación de espacio. Sin embargo, estas características pueden suponer también una desventaja ya que los parámetros de resolución, velocidad y aceleración de las piezas no son constantes, el software a emplear es complejo y los problemas de calibración-construcción son más difíciles de aislar. Además, hay escasa información disponible sobre este tipo de impresoras.

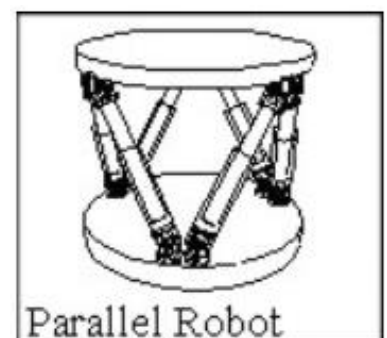


Fig. 4.6. Configuración paralela, tipo Delta. Fuente: <https://docplayer.es/>

- **Arquitectura polar:** el diseño de estas impresoras, también de estructura esférica, es muy similar al de las impresoras cartesianas, exceptuado por el sistema de coordenadas polares (ρ , ϕ , θ). Están formadas, por lo general, por dos articulaciones de rotación y una prismática, lo que le permite realizar movimiento rotacional, angular y lineal.

Esta configuración posee la ventaja de ser más simple en comparación con las dos estructuras anteriores, en cuanto a la necesidad de menor cantidad de motores, ya que solo emplea dos. Permite la fabricación de geometrías que incluyan curvas, aunque el campo de trabajo es limitado. Es una estructura estable, porque el tamaño de la base no precisa de gran superficie plana para ubicarse. No obstante, el software requerido es más difícil de diseñar debido a los cálculos requeridos.

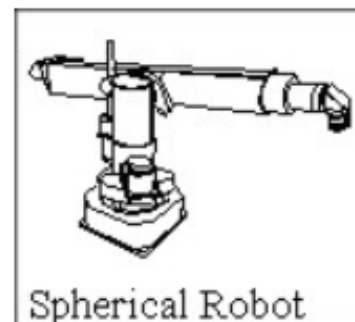


Fig. 4.7. Configuración esférica.

Fuente: <https://docplayer.es/>

- **Arquitectura cilíndrica:** uno de los movimientos, el de rotación, se efectúa sobre la base, y los otros dos son movimientos lineales. Las coordenadas de posicionamientos son las cilíndricas (ρ , ϕ , z), como corresponde.

Solamente resulta ventajosa si la edificación se construye alrededor de la máquina, con ella en el centro. Además, la precisión y resolución en la impresión varía en todo el volumen de trabajo, como en el caso anterior, y su geometría es compleja para el sistema de control.

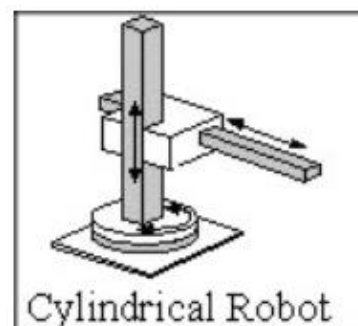


Fig. 4.8. Configuración cilíndrica.

Fuente: <https://docplayer.es/>

- **Arquitectura angular o antropomórfica:** simula el movimiento de un brazo humano. Las coordenadas que fijan la posición del punto son las angulares. En una configuración fácil de construir y facilita el acceso a espacios cerrados. Si se le añade una base móvil, su espacio de trabajo se amplía considerablemente.

Normalmente precisa de un seguimiento más estricto del sistema de control en el momento de ejecutar trayectorias rectilíneas.

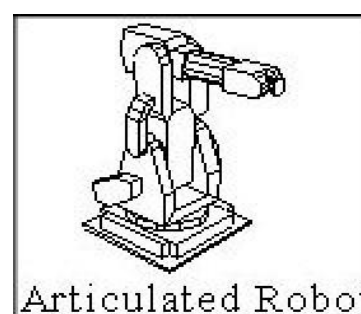


Fig. 4.9. Configuración angular, tipo antropomórfica (brazo humano).

Fuente: <https://docplayer.es/>

Como se ha señalado anteriormente, la configuración SCARA no se analiza con mayor detalle, ya que por el momento no se ha implantado ninguna impresora para la construcción con esta disposición de ejes. Es por este motivo que tampoco se considera para la elección del tipo de arquitectura.

Para la designación de la arquitectura más adecuada se propone una matriz de filtrado con diversos criterios de selección desde el **punto de vista técnico/ingenieril**. Éstos son la sencillez de la estructura, la estabilidad que presenta, la variedad de geometrías impresas que puede ofrecer, la cantidad de motores de los que precisa y la facilidad del diseño del software. Para la construcción de la matriz se emplea la arquitectura cartesiana como referencia, indicando con el signo “+” si la solución propuesta por otra configuración es más favorable o con un signo “-”, si es menos beneficiosa.

Arquitectura	Cartesiana	Delta	Polar	Cilíndrica	Angular
Estructura	0	-	0	0	0
Variedad de impresión	0	-	-	-	0
Estabilidad	0	-	0	0	0
Software	0	-	-	-	-
TOTAL	0	-4	-2	-2	-1

Tabla 4.1. Matriz de selección de la configuración según arquitectura.

En el caso de emplear criterios orientados a las **necesidades del cliente** con respecto al producto ofrecido y realizar una comparativa de la misma manera que anteriormente:

Arquitectura	Cartesiana	Delta	Polar	Cilíndrica	Angular
Velocidad de extrusión	0	+	0	0	0
Precisión	0	-	-	-	-
Vol. impresión/ Vol. impresora	0	-	+	+	+
Tiempo de instalación	0	-	+	+	+
Coste	0	-	-	-	-
TOTAL	0	-4	0	0	0

Tabla 4.2. Matriz de selección de la configuración según necesidades del cliente.

Teniendo en cuenta todos los criterios de selección, la configuración más atractiva para los clientes sería la cartesiana, por presentar mayores ventajas. Es evidente que, por la sencillez de sus elementos y por la estabilidad que ofrece, la cartesiana es la opción más conveniente.

4.2. Disposición de los ejes

A diferencia de las impresoras hobby, las impresoras para la construcción no incluyen una plataforma a la que otorgarle movimiento en algunos de los tres ejes cartesianos: X, Y o Z.

Estas estructuras se ubican sobre el terreno, ya preparado, sobre el que se desea alzar la edificación impresa. Por tanto, el movimiento se atribuirá al cabezal de extrusión, empleando los elementos de la propia estructura que le dan soporte.

4.3. Forma del chasis

Acto seguido se muestran varias de las posibles formas en las que podría basarse el diseño preliminar del sistema de 3 ejes. Todas ellas incluidas en la **arquitectura cartesiana tipo pórtico**, dada la selección efectuada. En primer lugar, se tiene las que se sustentan por dos pilares y posteriormente las que disponen de cuatro puntos de apoyo.

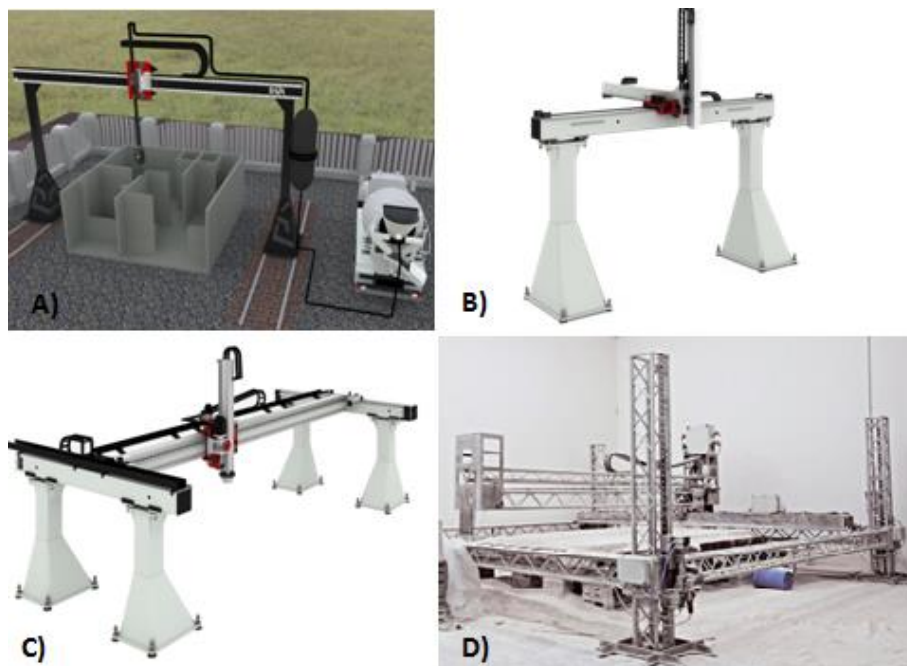


Fig. 4.10. Posibles formas de la estructura. Fuentes: <http://www.concrete-3dprinter.com/products.php> (A), <http://www.directindustry.com> (B y C) y <https://dshape.wordpress.com/applications/> (D).

- **Estructura A:** es una estructura compuesta por barras dispuestas en forma de H. Todo el sistema se mueve en la dirección de uno de los ejes por medio de unas guías situadas sobre el terreno. El movimiento en los otros dos ejes lo ejecuta el mecanismo que sustenta el cabezal de extrusión.
- **Estructura B:** también con forma de H. El movimiento se centra principalmente en la parte de la estructura destinada a la sujeción del extrusor, la cual se apoya sobre dos pilares que únicamente hacen la función de soporte. El eje transversal a la estructura en H presenta un voladizo para poder desplazar el cabezal de extrusión en una de las dos direcciones paralelas al suelo.
- **Estructura C:** estructura de pórtico doble que permite asegurar la estabilidad de los elementos que van a encargarse de realizar el movimiento en los 3 ejes. El perfil transversal a los dos pórticos permite el desplazamiento horizontal en uno de los ejes, mientras el extrusor se mueve sobre dicho eje y en dirección vertical.

- **Estructura D:** también es una estructura pórtico pero con arquitectura más compacta que la anterior. Las barras que encierran la superficie de impresión se encargan del movimiento vertical de la impresora, deslizándose sobre los pilares. Los perfiles horizontal y vertical que sujetan el extrusor realizan el movimiento en los otros dos ejes restantes.

Analizando las cuatro opciones, en una primera instancia se descartan las estructuras A y B. El hecho de que la estructura A esté constituida por un único pórtico que, además, se desplaza en su totalidad por unos raíles, dificulta la instalación de la impresora, ya que se requiere de una preparación previa de la superficie donde van a ser ubicadas estas guías. Igualmente, la estabilidad y precisión de la impresora se ven reducidas, a no ser que se implante un sistema de transmisión que asegure la minimización de estos dos requerimientos, lo que supondría elevar considerablemente el coste de la impresora.

En cuanto a la estructura B, el inconveniente reside en el voladizo del eje horizontal, ya que supone una limitación en la superficie de impresión, la cual quedaría reducida a dimensiones pequeñas. Del mismo modo, si se implanta un voladizo acorde a las especificaciones de dimensión máxima y/o al extrusor se le añade un pequeño depósito para cerciorar el abastecimiento de material, es posible que el eje sufra el fenómeno de pandeo, otorgando una inestabilidad no deseada.

Respecto a las estructuras C y D se obtiene una rigidez parecida con ambas, pero con mayor número de elementos en el segundo caso. Por lo que la estructura C es más fácil de transportar y de más sencillo montaje. Conjuntamente, en este sistema hay un mejor acceso a los elementos para su mantenimiento.

Por tanto, la estructura C es la que presenta más ventajas respecto a las otras y, por ese motivo, se considera la más adecuada.



Fig. 4.11. Esquema de la estructura escogida para el diseño.

5. DISEÑO DETALLADO

5.1. Descripción del conjunto

En primer lugar, se introduce la descripción general del conjunto, acompañada de la ilustración para comprender mejor el detalle del diseño de la impresora 3D.

Esta impresora funciona por extrusión de hormigón, su estructura se rige por coordenadas cartesianas y se basa en una estructura de perfiles constructivos. El movimiento a lo largo de los ejes X, Y y Z lo ejecuta el cabezal extrusor, el cual iría acoplado al módulo vertical móvil, a través de las vigas y elementos de transmisión que lo soportan.

Las dimensiones de la impresora son 19 m x 9,36 m x 8,6 m, intentando alcanzar el máximo establecido en las especificaciones, con el fin de abarcar la máxima superficie de impresión posible. De este modo, es viable levantar una construcción de hasta dos pisos con la impresora diseñada. Así, el área de impresión obtenida es de 17,98 m x 7,8 m, es decir, 138,84 m² con una altura máxima de 6,3 m.

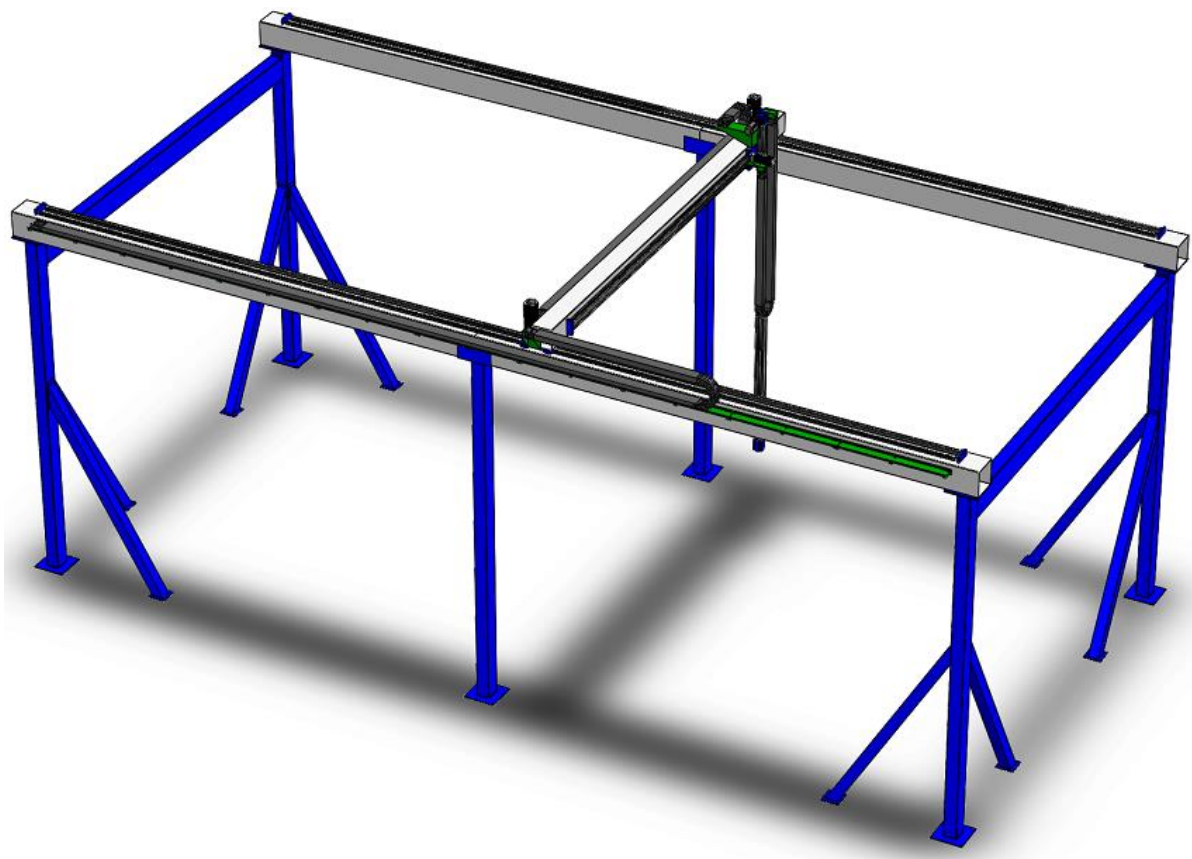


Fig. 5.1. CAD del diseño detallado de la impresora 3D.

Para mostrar con más exactitud los elementos de los que se compone, se detallan a continuación los cuatro grupos en los que se ha dividido la impresora: eje Z, eje X, eje Y y estructura soporte.

5.2. Eje Z

En este eje es donde se situaría el cabezal de extrusión, semejante al de la Fig. 5.2., con la boquilla del diámetro requerido en su parte inferior y alimentado por una manguera por donde circula el material proveniente de la máquina mezcladora e impulsora. Este mecanismo estaría sujeto en el extremo inferior del perfil tubular semi-rectangular, gracias a la placa de ensamblaje que puede incorporarse al final de la viga.



Fig. 5.2. Cabezal extrusor [16].

El conjunto del eje Z se ha seleccionado de entre los productos del proveedor *Bosc Rexroth*, empresa de ingeniería con sede en Alemania y muy conocida a nivel mundial por sus aplicaciones en la industria del automóvil, en maquinaria e ingeniería y en la automatización de fábricas.

El módulo lineal efectúa el movimiento vertical de elevación y descenso del cabezal con una longitud de carrera de 6,3 m (s_{max}), siendo 6,245 m de carrera efectiva y 55 mm a cada lado de exceso de carrera como distancia de frenado. Además se dejan 40 mm (L_{ad}) como margen de seguridad entre el carro y los topes de cada extremo por si hubiera sobrecarrera. Por tanto, la longitud total de la viga, sin contar la protección de los extremos, queda en 6,74 m.

El movimiento de este eje se ejecuta con un perfil compacto de aluminio, por su bajo peso, que tiene alojado en su interior un patín de bola sobre raíl como guía y un accionamiento de correa dentada. El patín y el raíl son de acero con revestimiento para la corrosión de cromo duro, luego el accionamiento dispone de poleas de acero que proporcionan una gran fuerza de accionamiento y precisión, así como una correa dentada de alto rendimiento. Este acople de piezas reduce las dimensiones del conjunto. Debido a las dos características mencionadas, peso ligero y dimensiones compactas, su transporte es fácil de realizar.

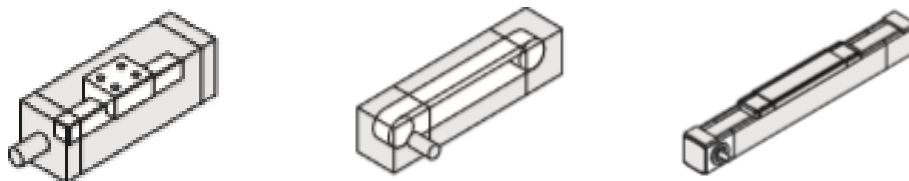


Fig. 5.3. Esquema del sistema de guías, del accionamiento y del conjunto del módulo lineal, de izquierda a derecha [23].

La mesa del eje Z que permite el desplazamiento de todo el módulo vertical y el anclaje al eje horizontal X, al igual que la estructura, es de aluminio anodizado⁷.

El motor está situado en el extremo superior del perfil de aluminio y se trata de un MSK-076C-0450, proporcionado por el mismo proveedor. Su montaje se realiza mediante la conexión con un reductor con relación de transmisión $i=16$.

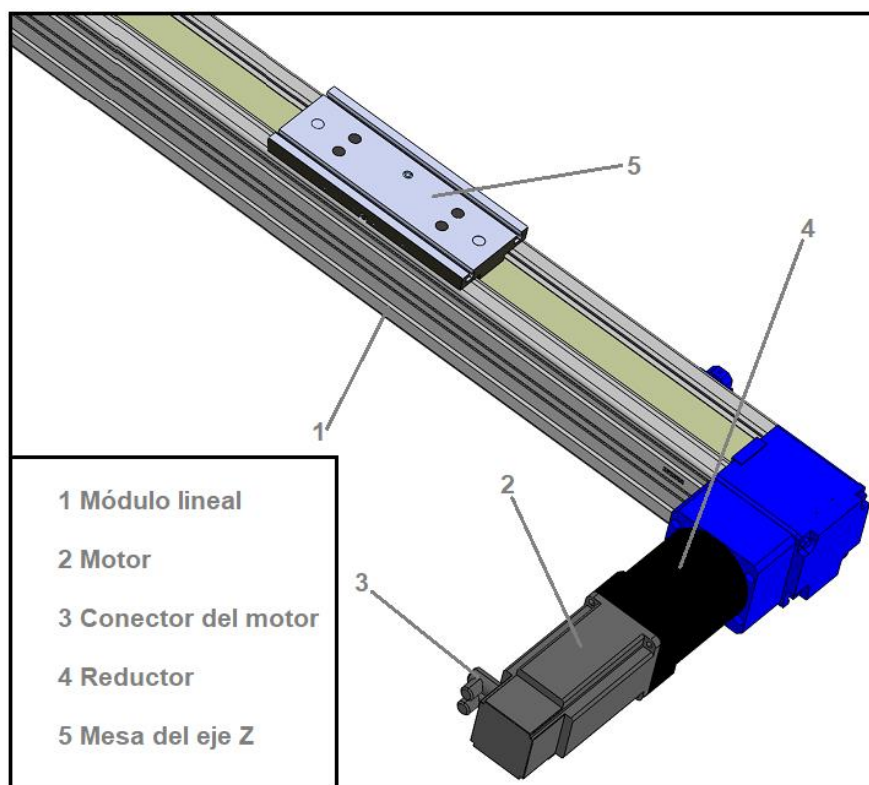


Fig. 5.4. Esquema de la conexión del motor con el reductor y, a su vez, con el módulo lineal [23].

Mediante un montaje suspendido se ubica cerca del motor la cadena portacables Easy Chain para proteger el cableado.

La unidad del eje vertical resulta rígida y precisa, ejecutando un movimiento exacto y limpio. Al mismo tiempo, presenta una capacidad de carga igual que otras opciones como, por ejemplo, un sistema con accionamiento de husillo de bolas, pero teniendo la disponibilidad de longitudes de carrera mayores. El conjunto tiene una repetibilidad de $\pm 0,05$ mm.

Dispone de un sistema de medición integrado que no requiere de espacio adicional, ya que sus componentes están integrados en el sistema de guía. Este tipo de acoplamiento simplifica el montaje y la calibración.

⁷ **Anodizado:** recubrimiento en forma de delgada capa de óxido sobre el aluminio, que lo protege de los agentes atmosféricos.

Asimismo, para proteger el fin de carrera, el módulo lineal viene provisto de sensores como los interruptores mecánicos y los inductivos, que prevén el fin del movimiento.

Los interruptores inductivos, los cuales conmutan por un imán conectado en la mesa, tienen varias ventajas respecto a los mecánicos: no se desgastan por contacto físico con otros elementos; no hay rebotes; únicamente detectan los elementos férreos, por lo que no se ven influidos por otros elementos del entorno; son menos sensibles a la influencia del medio ambiente. No obstante, los interruptores mecánicos tienen menor porcentaje de equivocación en la medición si trabajan en la frecuencia correcta. Además, tienen contacto directo con el elemento, de manera que la medida siempre es exacta.

Igualmente, tiene integrado un sistema de lubricación por grasa líquida, con buena resistencia al agua, protección anticorrosiva y con rango de temperaturas de -20°C a 80°C.

Los elementos del eje vertical Z son los siguientes:

Id.	Cantidad	Descripción
1	1	Cabezal de accionamiento
2	1	Correa dentada debajo de protección
3	1	Carro con patines
4	1	Cabezal de extremo inferior
5	1	Perfil vertical 165 mm x 165 mm y de longitud total 7.160 mm
6	1	Canal de fijación de cables del perfil vertical
7	1	Interruptor inductivo
8	2	Interruptor mecánico
9	1	Reductor PG160 con $i=16$
10	1	Motor MSK076C-450
11	1	Cadenas portacables IGUS
12	1	Unión de la cadena portacables IGUS con el eje Z
13	1	Unión de la cadena portacables IGUS con el carro del eje Z
14	1	Ángulo de conmutación para los interruptores

Tabla 5.1. Listado de piezas que componen el eje Z.

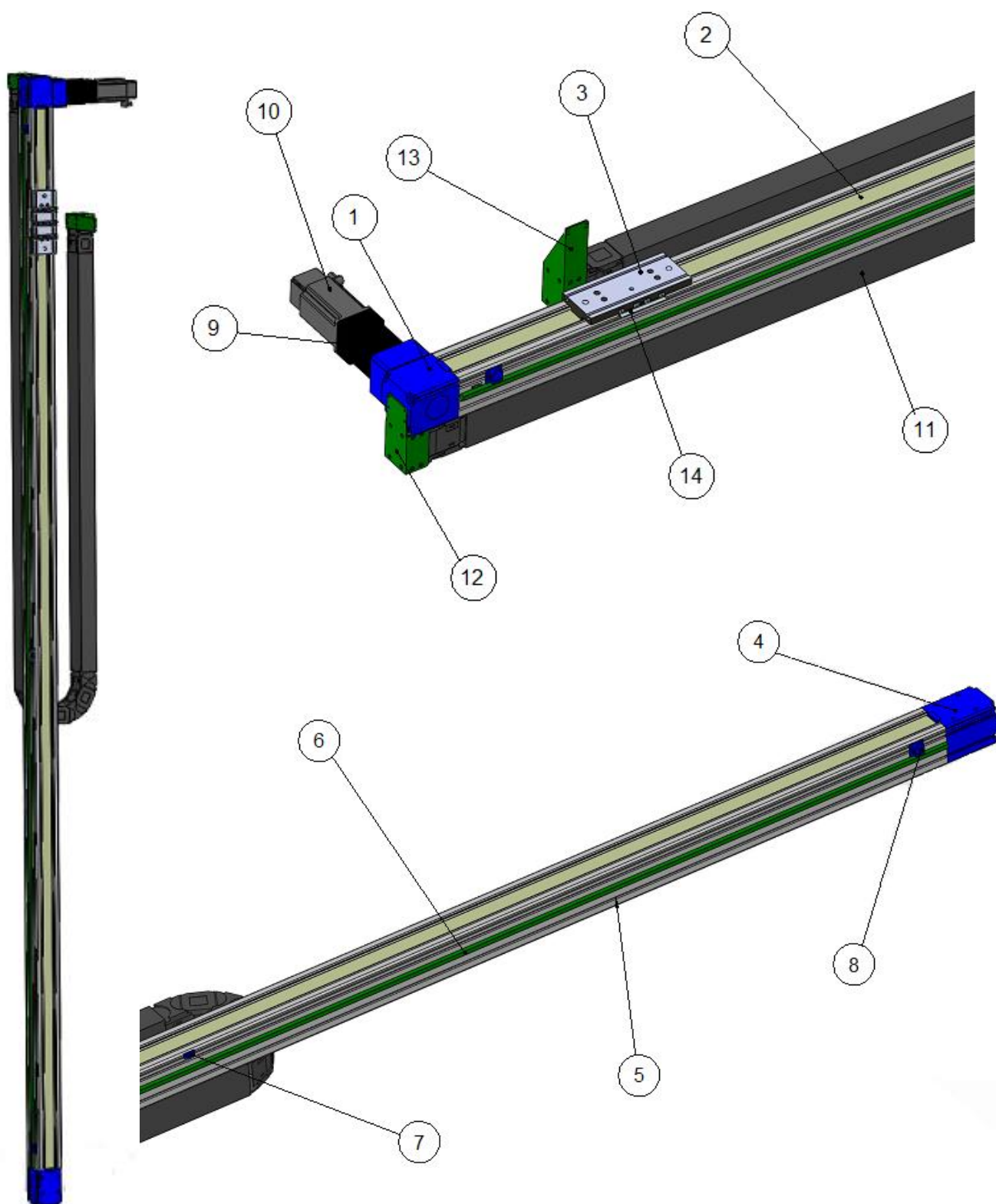
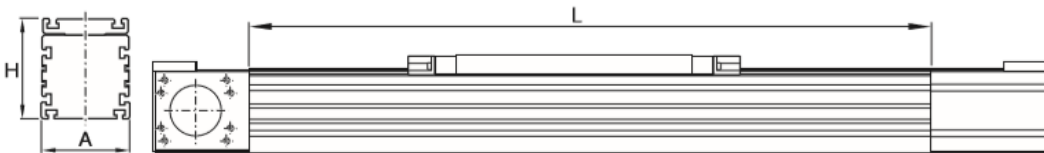


Fig. 5.5. CAD completo y detalle del Eje Z.

5.2.1. Elección del eje Z

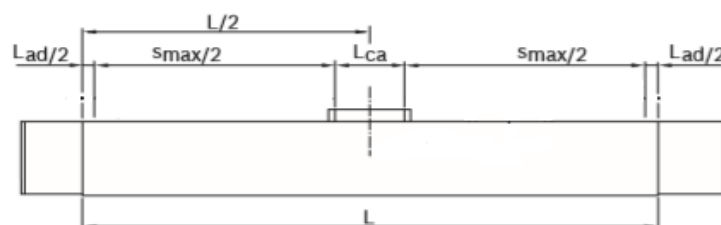
Revisando los proveedores disponibles (*Gudel, Zollern, Hepco Motion, Festo, Parker Motion...*), se ha encontrado que *Bosch Rexroth* dispone de módulos lineales con largura suficiente para el eje de estudio. Teniendo en cuenta la longitud máxima deseada y evitando el sobredimensionamiento excesivo, la opción de mayor validez es la detallada a continuación. El conjunto del elemento se denomina MKR-165 y se basa en un perfil de aluminio con módulo de elasticidad igual a 70.000 N/mm^2 .



Elemento	A (mm)	H (mm)	$L_{\text{máx}}$ (mm)	Carga Dinámica máx. (N)
MKR-165	165	195	12.000	84.100

Tabla 5.2. Datos básicos del perfil del eje Z [23].

En este caso, el eje se posiciona verticalmente con cargas externas debidas al portacables IGUS (314,28 N) y la manguera de hormigón (492,20 N). La elección, por tanto, se basa en: el propio peso, que debe cumplir la especificación establecida; la capacidad carga; la longitud de carrera requerida, considerando los márgenes para sobrecarrera (L_{ad}); y el sistema de accionamiento de moto-reductor compatible con el sistema mecánico.



L_{ca} (mm)	m_{ca} (kg)	L_{ad} (mm)	Parte fija de la masa ($k_{\text{g fix}}$, kg)	Parte variable de la masa ($k_{\text{g var}}$, kg/mm)
400	11,5	40	36	0,0384

Tabla 5.3. Datos técnicos generales [23].

$$L = S_{\text{max}} + L_{\text{ca}} + L_{\text{ad}} \quad (\text{Ec. 5.1.})$$

$$L = 6.300 \text{ mm} + 400 \text{ mm} + 40 \text{ mm} = \mathbf{6740 \text{ mm}}$$

Donde:

- **L**: longitud del perfil sin tener en cuenta la dimensión de los cabezales de los extremos.

El sistema elegido es compatible con dos reductores, uno de los cuales se ajusta más a las necesidades.

Reductor	Rel. Transmisión, i	M_{ge} (N·m)	M_{Rge} (N·m)	n_{ge} (r.p.m.)	J_{ge} (kg·m ²)	Peso (m_{ge} , N)
PG160	16	1280	2,20	6.500	$5,4 \cdot 10^{-4}$	215,82

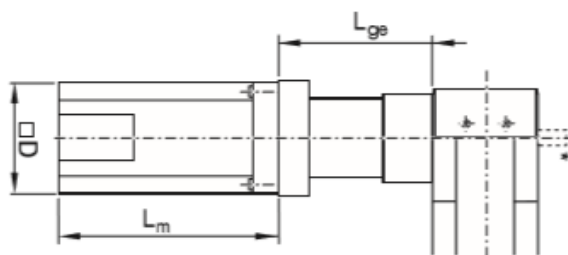
Tabla 5.4. Datos técnicos del reductor [23].

Según las características del reductor y de la dimensión de la mesa, el eje de accionamiento se describe por los valores de la *Tabla 5.5*.

i	M_p (N·m)	v_{max} (m/s)	L_{ca} (mm)	Parte fija del momento inercia ($k_{J\text{ fix}}$, kg·mm ²)	Parte variable ($k_{J\text{ var}}$, kg·mm)	Parte específica ($k_{J\text{ m}}$, kg·mm ²)	M_{Rs} (N·m)	Ø Polea (d_3 , mm)
16	23	2	400	70.428	7,06	4904	14,5	140,05

Tabla 5.5. Datos técnicos del sistema de accionamiento [23].

El motor que puede acoplarse al reductor con la relación de transmisión deseada y que resulta factible como elemento accionador del conjunto es el MSK076C-0450.



Motor	ØD (mm)	L_m (mm)	Reductor	L_{ge} (mm)
MSK076C-0450	140	292,5	PG160	313,5

Tabla 5.6. Datos dimensionales de la unión del motor y el reductor [23].

n_{max} (r.p.m.)	Momento continuo, M_0 (N·m)	Par máx. motor, M_{max} (N·m)	Momento inercia motor, J_m (kg·m ²)	Momento inercia freno, J_{br} (kg·m ²)	Masa motor, m_m (N)	Masa freno, m_{br} (N)
5.000	12	43,5	0,00430	0,00036	135,38	10,79

Tabla 5.7. Datos técnicos del motor [23].

Como puede observarse en la tabla anterior, el motor dispone de freno de retención.

Las condiciones de servicio para el motor son de 0°C a 40°C, siendo a partir de esta última cuando merma su potencia. El rango de temperaturas al que puede trabajar la mecánica del conjunto es de -10°C a 60°C.

A grandes rasgos, las especificaciones de los sensores ensamblados al módulo lineal son:

- Interruptores inductivos
 - Tensión de servicio: 10-30 V CC
 - Carga: ≤ 200 mA
 - Frecuencia de conmutación: 2,5 kHz
 - Temperatura de servicio: de -40°C a $+70^{\circ}\text{C}$
 - Protección: contra penetración de polvo, contra contacto y contra chorros de agua.



Fig. 5.6. Interruptor inductivo de fin de carrera y de referencia [23].

- Interruptores mecánicos
 - Tensión de servicio: 250 V CA
 - Carga: ≤ 5
 - Velocidades de aproximación máximas: 1 m/s
 - Frecuencia de conmutación: 3,3 Hz
 - Temperatura de servicio: de -5°C a $+85^{\circ}\text{C}$
 - Protección: contra penetración de polvo y contra penetración de agua sumergiéndolo.



Fig. 5.7. Interruptor mecánico [23].

5.2.2. Dimensionado del accionamiento del eje Z

A partir de la elección anterior, se conocen los valores concretos de los diferentes elementos que componen el eje Z. En función de estos datos, se describen una serie de cálculos para verificar la funcionalidad del módulo escogido.

Según el proveedor, es posible verificar que el accionamiento del modelo es el adecuado, comprobando el cumplimiento de dos condiciones de la manera siguiente:

- **Condición 1:** las revoluciones del motor, n_{motor} , deben ser superiores o iguales a las revoluciones requeridas.

1.a. Revoluciones máximas admisibles, n_{max} :

$$n_{max} = \min\{n_p \cdot i ; n_{ge}\} \quad (Ec. 5.2.)$$

$$n_p = \frac{v_{max} \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot d_3} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot 140,05} = 272,44 \text{ r.p.m.}$$

$$\text{Por tanto, } n_{max} = \min\{272,44 \cdot 16 ; 6.500\} = 4.363,834 \text{ r.p.m.}$$

Donde:

- n_p : velocidad de giro máxima admisible del módulo lineal (r.p.m.).
- i : relación de transmisión.
- n_{ge} : velocidad de giro máxima admisible del reductor (r.p.m.).
- v_{max} : máxima velocidad permisible del conjunto (m/s).
- d_3 : diámetro de la polea de la correa dentada (mm).

1.b. Revoluciones admisibles según velocidad requerida, $v_{mech} = 0,4 \text{ m/s}$:

$$n_{mech} = \frac{v_{mech} \cdot i \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot d_3} = \frac{0,4 \cdot 16 \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot 140,05} = 872,767 \text{ r.p.m.} \quad (Ec. 5.3)$$

Se comprueba que las revoluciones calculadas a partir de la velocidad que debe alcanzar el sistema, n_{mech} , son menores a las máximas admisibles del módulo lineal, n_{max} . Pero además, según esta primera condición, es necesario asegurar que el motor sea capaz de proporcionarlas. De este modo,

$$n_{motor} \geq n_{mech} \implies 5.000 \text{ r.p.m.} \geq 872,767 \text{ r.p.m.} \quad \checkmark$$

- **Condición 2:** el momento de accionamiento continuo del motor, siendo éste el momento de accionamiento máximo admisible, debe ser mayor al momento del motor requerido.

2.a. Momento de inercia total de las masas, J_{total} :

$$J_{total} = (J_m + J_{br}) \cdot i + J_{ge} + \frac{J_s + J_t}{i^2} \quad (\text{Ec. 5.4.})$$

$$J_s + J_t = [(k_{Jfix} + k_{Jvar} \cdot L) \cdot 10^{-6}] + [m_{ext} \cdot k_{Jm} \cdot 10^{-6}] \quad (\text{Ec. 5.5.})$$

Por tanto,

$$J_s + J_t = [(70.428 + 7,06 \cdot 6740) \cdot 10^{-6}] + [82,21 \cdot 4904 \cdot 10^{-6}] = 0,521155 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$J_{total} = (0,00430 + 0,00036) \cdot 16 + 0,00075 + \frac{(0,521155)}{16^2} = 0,0773 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Donde:

- J_{ge} : momento de inercia de la masa del reductor ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).
- J_s : momento de inercia de la masa del módulo lineal ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).
- J_t : momento de inercia de la masa de la carga externa ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).
- k_{Jfix} : constante para la parte fija del momento inercia de la masa ($\text{kg} \cdot \text{mm}^2$).
- k_{Jvar} : constante para la parte variable en longitud del momento inercia de la masa ($\text{kg} \cdot \text{mm}$).
- k_{Jm} : constante para la parte específica de las masas del momento inercia de la masa ($\text{kg} \cdot \text{mm}$).
- m_{ext} : masa de la carga externa, debida a la manguera de hormigón y la cadena portacables IGUS del eje Z (kg).
- J_m : momento de inercia de la masa del motor ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$). Está directamente relacionado con su tamaño.
- J_{br} : momento de inercia de la masa del freno del motor ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

2.b. Momento de fricción total, M_{fric} :

$$M_{fric} = M_{Rge} + \frac{M_{Rs}}{i} \quad (\text{Ec. 5.6.})$$

$$M_{fric} = 2,20 + \frac{14,50}{16} = 3,106 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Donde:

- M_{Rge} : momento de fricción del reductor ($\text{N} \cdot \text{m}$).
- M_{Rs} : momento de fricción del módulo lineal ($\text{N} \cdot \text{m}$).

2.c. Momento del peso del módulo lineal cuando el montaje es vertical, M_g :

$$M_g = \frac{d_3 \cdot (m_{ex} + m_{ca}) \cdot g}{2000 \cdot i} = \frac{140,05 \cdot (82,21 + 11,5) \cdot 9,81}{2000 \cdot 16} = 4,023 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Donde:

- m_{ca} : masa de la mesa (kg).
- g : gravedad, igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Con los valores calculados a partir de las ecuaciones anteriores, es posible obtener el par del motor necesario.

$$M_m = J_{total} \cdot \frac{a}{r_{polea}} + M_g + M_{fric} = 0,0773 \cdot \frac{0,3333}{0,070025} + 4,023 + 3,106 = 7,4970 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Ec. 5.7.})$$

Donde:

- a : aceleración del carro (m/s^2).
- r_{polea} : radio del piñón de accionamiento del motor (mm).

La suma de los momentos de fricción y del peso del módulo en montaje vertical, junto el momento que producen las inercias de todo el conjunto, dan un par requerido de $7,4970 \text{ N} \cdot \text{m}$.

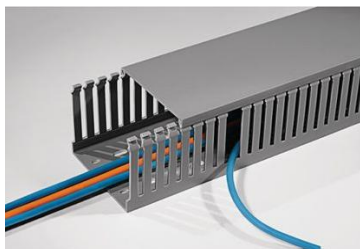
Si se compara este valor con el par continuo de motor, se observa que el primero es menor al segundo. Por este motivo, se considera que el sistema de accionamiento es válido para el correcto funcionamiento del eje Z.

$$12 \text{ N} \cdot \text{m} \geq 7,4970 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \checkmark$$

La alimentación del motor es trifásica de corriente alterna con un voltaje, para este caso, de 400V .

5.2.3. Soportes y sujeciones

Las opciones estudiadas para la organización y protección tanto del cableado como de la manguera de alimentación, han sido las siguientes:



Canalización de cables



Cadena portacables



Bandeja soporte



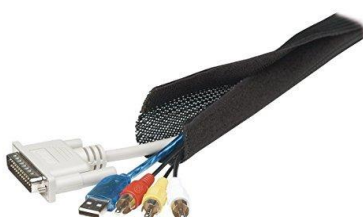
Bridas



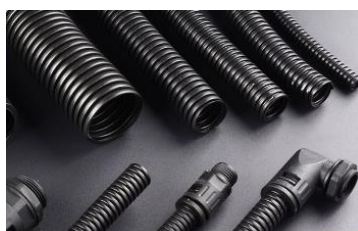
Panel pasacables



Organizadores



Flexwrap y mangas



Tuberías corrugadas



Correa de velcro

Tabla 5.8. Opciones estudiadas para la organización de cables.

De entre estas alternativas, las que presentan mayor funcionalidad en cuanto a sujeción y organización de cables, así como de protección del exterior, son los sistemas de canalización y las cadenas portacables. La colocación de cada una de las elecciones depende de su uso.

En las partes de la estructura y en las zonas externas a ella que no se vean afectadas por el movimiento, es suficiente con la colocación de una canalización de cables que los guíe y proteja.

Por consiguiente, en las zonas en las que se requiere de desplazamientos, se emplea cadenas portacables, porque son las que facilitan en mayor medida el movimiento de los cables, fijando su trayectoria sin interrumpir el funcionamiento de la impresora y agilizando la introducción de los elementos en su interior. Además, los cables que se alojan en él, quedan resguardados de obstáculos o sucesos que puedan provocar su rotura.

Entre los tipos y modelos de cadenas portacables, los cuales varían según sus dimensiones y función, las cadenas más utilitarias son las E-Chain del proveedor IGUS por sus múltiples ventajas.

Entre sus características destacan:

- Gran variedad de longitudes de carrera y velocidades aplicables.
- Silenciosas, de baja abrasión y sin vibraciones.
- Tiempo de instalación mínimo, dado que se suministran listas para ser conectadas.
- Modular y de fácil llenado, lo que traduce en ahorro de espacio de almacenamiento.
- Mantenimiento mínimo.
- Configurables on-line.
- Ligeras.
- Adaptables a cualquier tipo de movimiento, posición y entorno.
- Conducen prácticamente todo tipo de cables: electricidad, gas, aire, líquidos...

Para la selección de la cadena portacables IGUS más adecuada, se ha definido su posición (vertical u horizontal), la longitud de carrera necesaria según el eje donde va ubicada y el peso estimado que llenado.

5.2.4. Determinación del peso de la manguera

Para hacer una estimación del peso de la manguera que se apoya sobre los diferentes perfiles, se ha considerado la densidad más elevada del hormigón convencional, $\rho_{\text{hormigón}} = 2.400 \text{ kg/m}^3$, utilizado para elementos estructurales.

Conociendo el área que ocupa, suponiendo un diámetro de manguera igual a $\varnothing_{\text{manguera}} = 65 \text{ mm}$, es posible extraer el peso por metro lineal del material a extruir. Por tanto, con el diámetro comentado, el área del círculo es de $33,18 \text{ cm}^2$. Si se multiplica por la densidad del hormigón y por la gravedad, se obtiene el valor siguiente:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{manguera}} &= \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_{\text{manguera}}}{2} \right)^2 & (\text{Ec. 5.8.}) \\ \text{Peso lineal} &= S_{\text{manguera}} \cdot \rho_{\text{hormigón}} & (\text{Ec. 5.9.}) \end{aligned} \right\} \text{Peso lineal} = \pi \cdot \left(\frac{65 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \cdot 2.400 = 7,9639 \text{ kg/m}$$

A su vez, si este último valor se multiplica por la longitud de los perfiles que recorre, se obtiene el peso exacto sobre cada una de las vigas.

$$\text{Peso manguera} = \text{Peso lineal} \cdot L_{\text{manguera}} \cdot g \quad (\text{Ec. 5.10.})$$

Por ejemplo,

- peso de la manguera sobre el Eje Z = $7,9639 \text{ kg/m} \cdot 6,3 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 492,20 \text{ N}$

5.3. Eje X

En este eje es donde se apoya el módulo móvil vertical, el cual se moverá a lo largo del eje X gracias a unas guías paralelas con recorrido de 7804 mm. Estas guías se sitúan sobre unos espaciadores de la misma largura, con el fin de evitar el rozamiento del carro con el perfil tubular cuadrado que constituye el eje X.

El carro dispone de los elementos necesarios para la transmisión, como son los rodamientos con baja fricción al deslizarse, las caperuzas que los protegen y lubrican, y el motor *Bosch Rexroth* MSK070C-150 que otorga el movimiento lineal al eje Z. Por tanto, es en este carro sobre el que se ubica la placa soporte en forma de L que marca el camino de la cadena portacables E-Chain, la cual garantiza la protección del cableado que deriva de los elementos ensamblados. Al mismo tiempo, la cadena portacables descansa sobre una bandeja de soporte de ligero peso.

Además, este eje horizontal cuenta con unos topes de goma que limitan la carrera del carro, impidiendo el descarrilamiento del conjunto.

La ubicación de cada una de las piezas que conforman el eje X se detalla a continuación.

Id.	Cantidad	Descripción
14	2	Guías lineales con cremallera
15	2	Espaciadores lineales
16	1	Motor MSK070C-150
17	2	Unidades amortiguadoras con topes de goma
18	1	Mesa del carro
19	4	Rodamientos de doble hilera de bolas
20	4	Caperuzas de retén lubricadoras
21	1	Lubricador automático de la cremallera
22	1	Cadena portacables IGUS del eje X
23	1	Bandejas de soporte de la cadena IGUS en eje X
24	1	Unión de la cadena portacables IGUS con el carro del eje X
25	3	Uniones entre mesas de carros
26	1	Perfil horizontal 400 mm x 400 mm x 8 mm y longitud total de 9.000 mm

Tabla 5.9. Listado de piezas que forman parte del eje X.

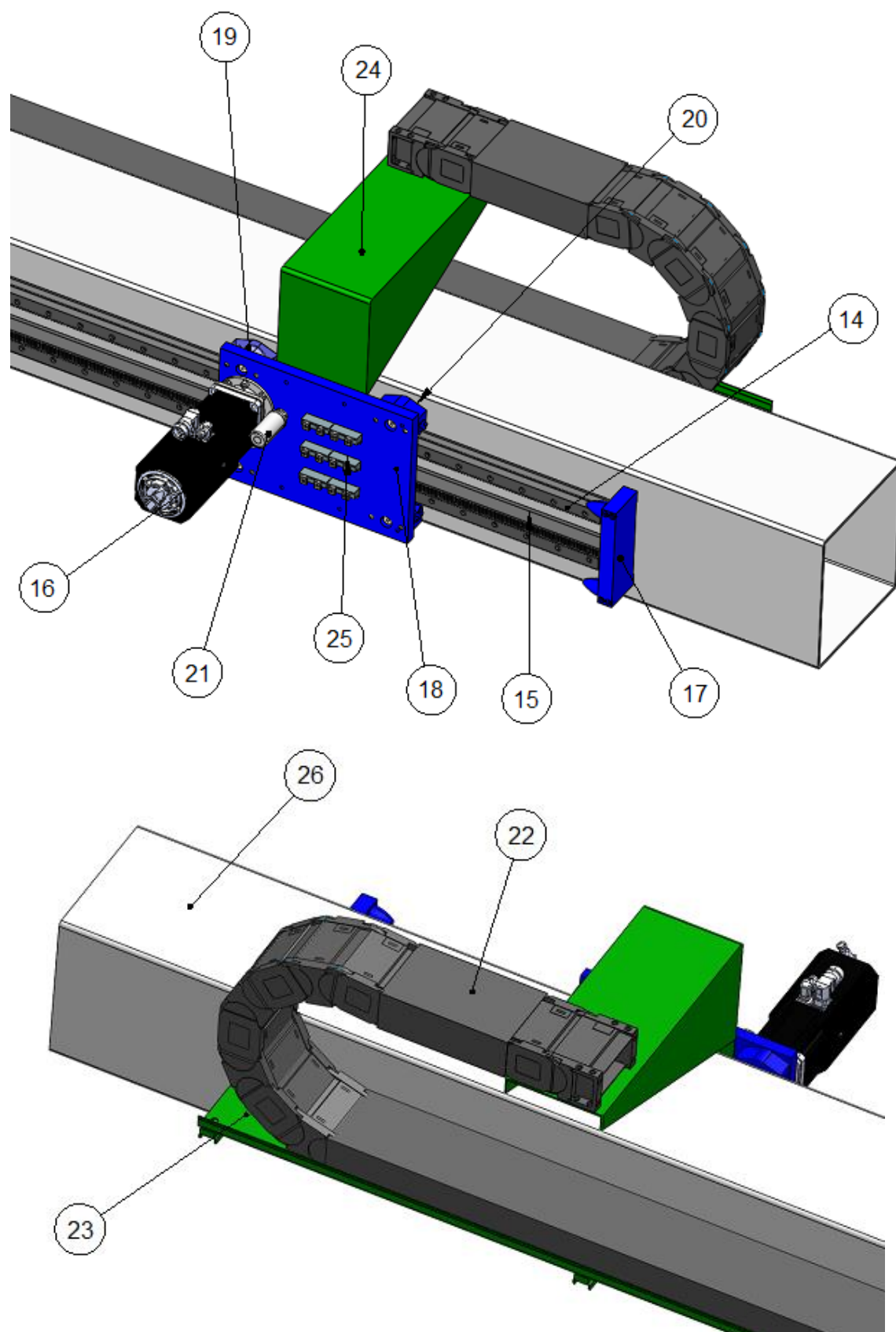


Fig. 5.8. Detalle del Eje X.

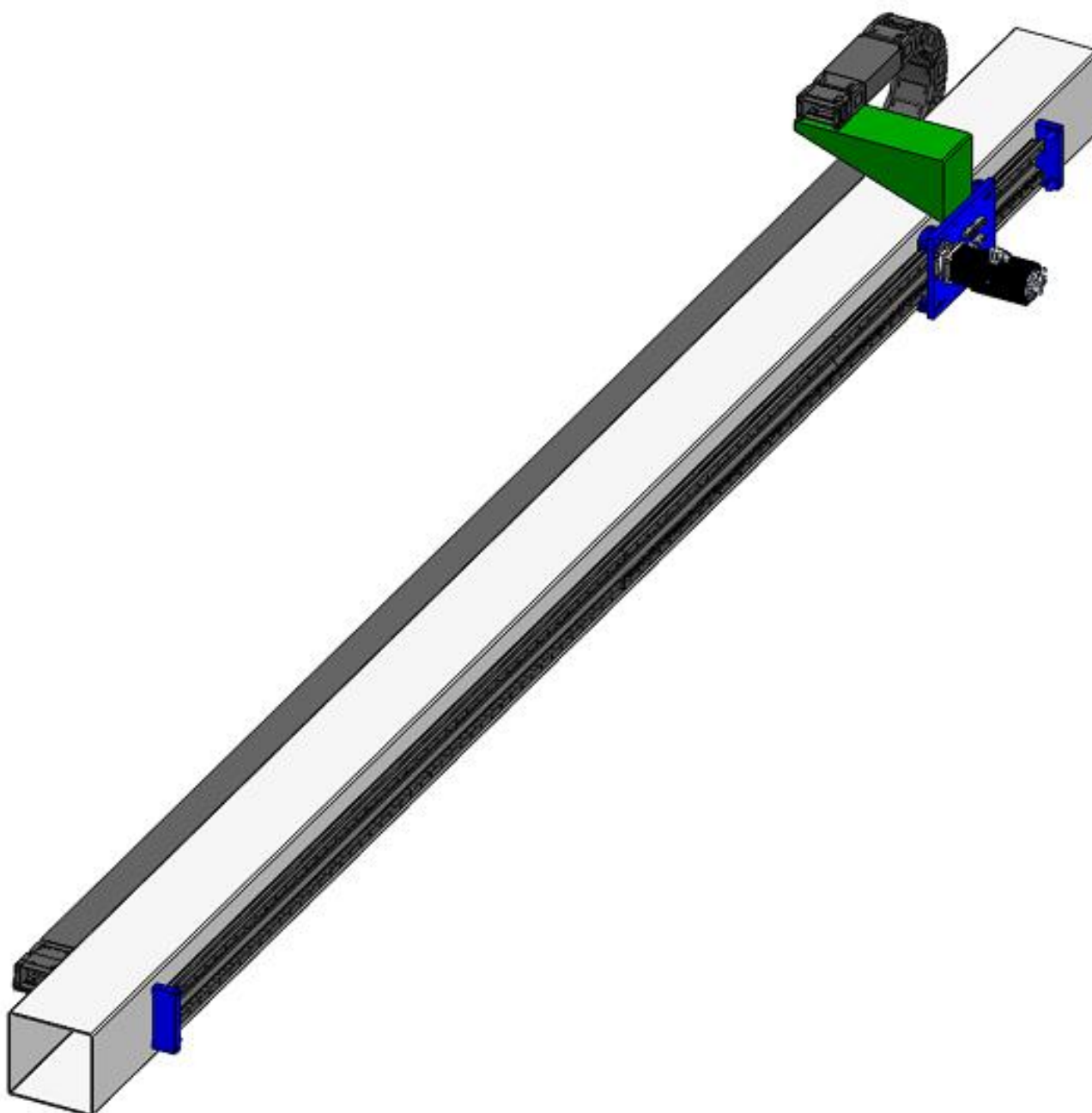


Fig. 5.9. CAD completo del Eje X.

5.3.1. Elementos de transmisión de movimiento en eje X

Para transmitir el movimiento en la dirección X, así como en la dirección Y, se ha optado por el uso de guías de acero lineales de simple canto en V con cremallera. Este ángulo en V aporta versatilidad y facilidad de combinación entre guías y rodamientos. Las superficies de rodadura de las guías tienen un endurecido profundo que les otorga una mayor resistencia al desgaste. Son adaptables a cualquier longitud, ya que permite la unión de varios tramos, alcanzando longitudes ilimitadas. Los dientes de la cremallera y las posiciones de los agujeros de montaje no suponen problema, al estar optimizados para permitir una transición precisa a través de las juntas.

Se ha considerado que la guía de simple canto es mejor alternativa que la de doble canto, por su baja adaptabilidad en el sistema. Su anchura limita las dimensiones del carro y su ubicación en el conjunto. Asimismo, el sistema debe poder accionarse mediante motor y ofrecer cierta precisión en la ejecución del movimiento. Por ello, es necesaria la relación cremallera-piñón.

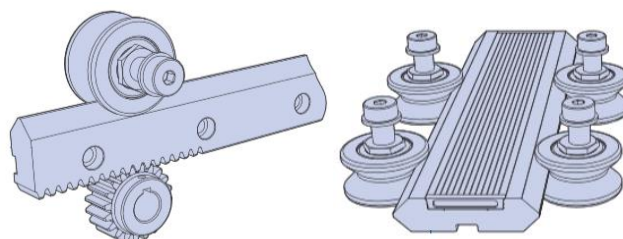
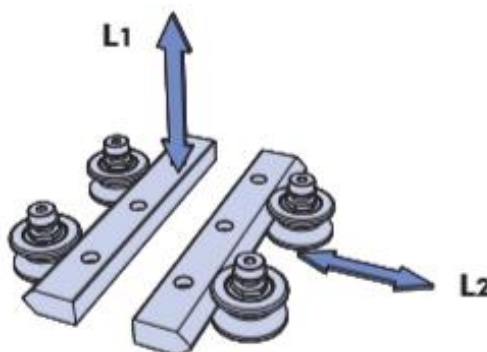


Fig. 5.10. Alternativas de Hepco Motion disponibles para guías [24].

Los rodamientos, acordes al tipo de guía elegido, son en V y tienen una alta capacidad de carga, de hasta 50 kN cada uno. Son de montaje y desmontaje sencillo, permitiendo la instalación fuera del paralelismo de las guías e independiente del carro donde van ubicados. Su superficie angular de contacto con la guía evita la desalineación.

Las caperuzas que envuelven a los rodamientos, protegen a estos últimos de la suciedad y se encargan de mantenerlos lubricados.

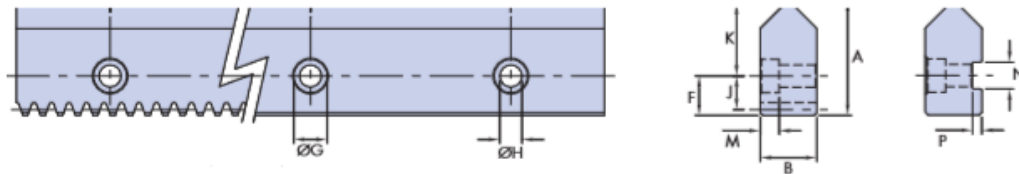
Las guías y rodamientos disponibles según la carga máxima del sistema son las mostradas en la *Tabla 5.10*.



Tamaño y Tipo de Guía	Ø Rodamiento	Carga del Sistema	
		L ₁	L ₂
Simple Canto 25	64	10.000 N	16.000 N
Simple Canto 25	95	28.000 N	40.000 N
Simple Canto 25	120	40.000 N	60.000 N
Simple Canto 33	128	40.000 N	60.000 N
Simple Canto 33	150	68.000 N	100.000 N

Tabla 5.10. Datos para una primera selección de las guías y rodamientos [24].

Las dimensiones que ofrece el proveedor *Hepco Motion* para guías de simple canto en V pueden contener cremallera recta o helicoidal y los pasos entre dientes son variados. No obstante, las cremalleras helicoidales, con un ángulo de hélice izquierdo de 30°, son la elección más ajustada, ya que transmiten más potencia y velocidad, siendo menos ruidosas y más duraderas. Teniendo en cuenta esto, las alternativas disponibles son las mostradas en la tabla siguiente.



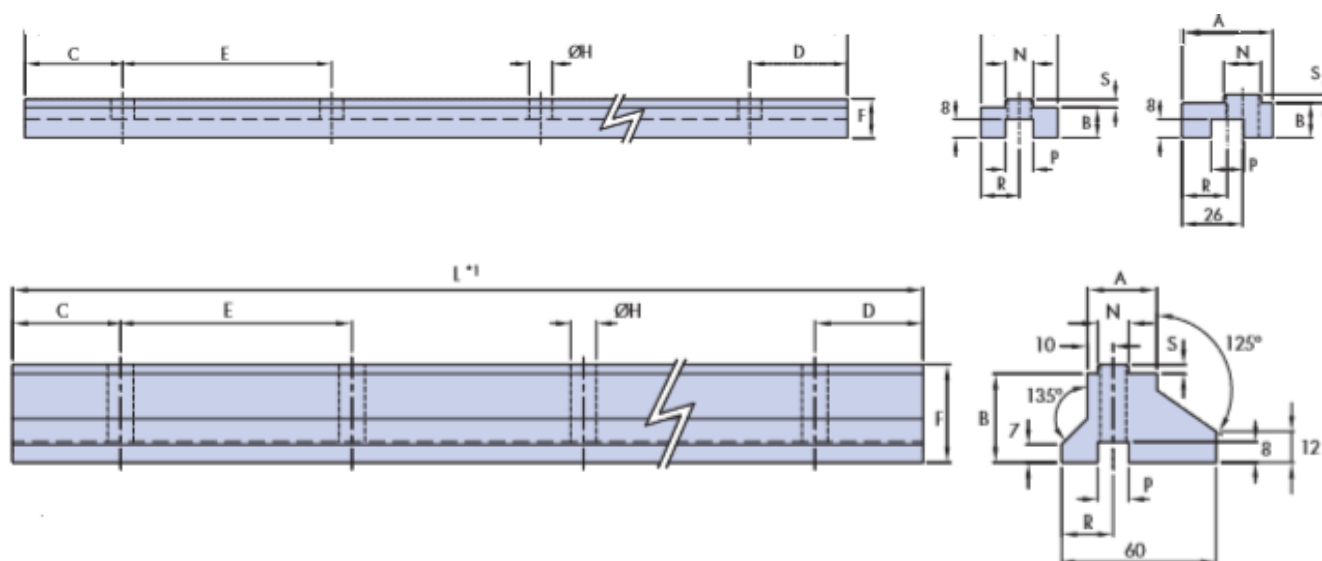
Tamaño y Tipo de Guía	A (mm)	B (mm)	G (mm)	H (mm)	J (Módulo Cremallera, mm)		Peso (N/m)
					2,5	4	
Simple Canto 25	51,7	25,4	15	10	15,1	-	78,48
Simple Canto 33	57,7	33,4	20	14	-	22,1	120,66

Tabla 5.11. Dimensiones principales de la guía de Simple Canto en V [24].

Para evitar que los rodamientos y piñones rocen con la superficie sobre la que irían atornilladas las guías, es preciso añadir un espaciador entre la viga y la guía que proporcione el espacio necesario. Su diseño puede incorporarse al diseño de la impresora, no siendo obligatorio el uso de las vigas de construcción del proveedor elegido.

El más adecuado es el espaciador estrecho, ya que el ancho es específico para las guías de doble canto, las cuales no se consideran para el diseño. Al igual que las guías, pueden ser suministradas con una cierta largura máxima pero pueden unirse diversas unidades para obtener la longitud deseada.

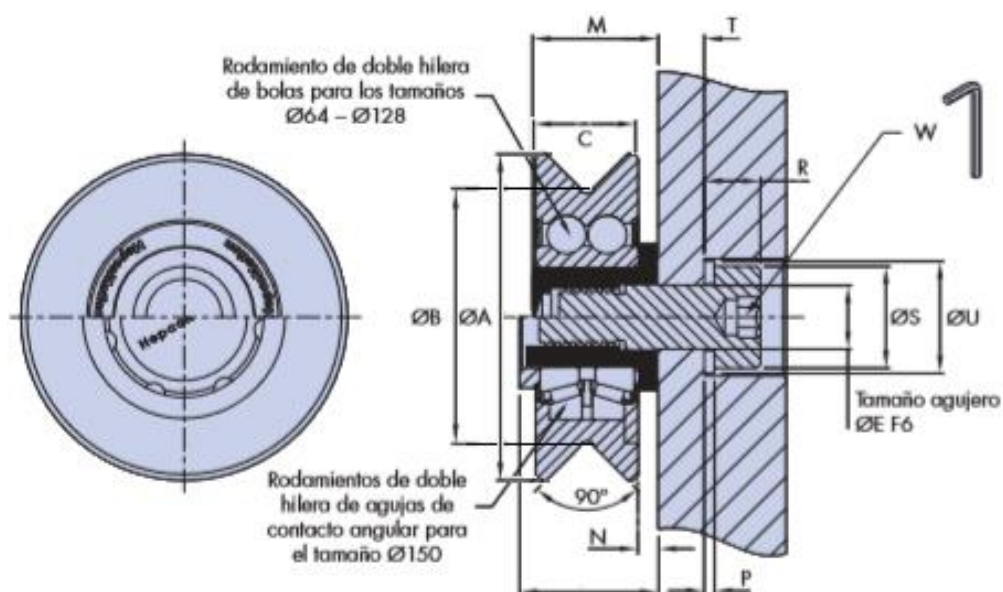
Están fabricados de aluminio de alta resistencia sometido a un anodizado transparente, es decir, recubiertos por una película de óxido que les protege de los agentes atmosféricos.



Tamaño y Tipo de Espaciador	A (mm)	B (mm)	H (mm)	P (mm)		Peso (N/m)
Espaciador Bajo 25	33	13	10	12	0	9,81
					-0,2	
Espaciador Bajo 33	39	15	14	16	0	15,70
					-0,3	
Espaciador Alto 25	27	34,5	10	12	0	37,28
					-0,3	
Espaciador Alto 33	27	30,8	14	16	0	36,30
					-0,2	

Tabla 5.12. Dimensiones principales de los espaciadores estrechos [24].

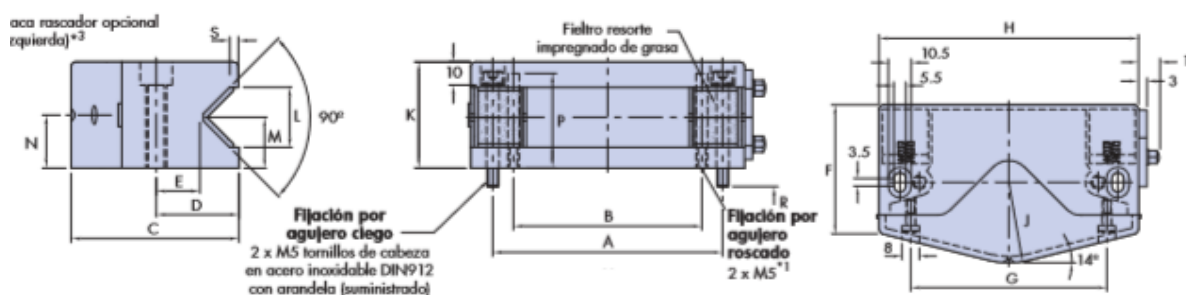
Los rodamientos que corren por las guías de simple canto en V utilizan rodamientos de doble hilera de bolas que dotan al elemento de gran capacidad de carga axial y radial.



ØA	Guía en V compatible	B ±0,015 (mm)	C (mm)	M (mm)	Peso (kg)	Máx. Capacidad de Carga (N)	
						Axial	Radial
64	Simple canto 25	41	34	40	0,65	2.500	8.000
95	Simple canto 25	72	34	40	1,45	7.000	20.000
120	Simple canto 25	96	40	50	3,0	10.000	30.000
128	Simple canto 33	96	40	50	3,0	10.000	30.000
150	Simple canto 33	118	60	80	7,5	17.000	50.000

Tabla 5.13. Dimensiones principales de los rodamientos en V [24].

Para aumentar la capacidad de carga y la vida de los rodamientos, éstos se cubren con caperuzas de plástico resistente a golpes y de sección desmontable para ajustar los rodamientos. Previenen de la suciedad, ofrecen más seguridad y mejoran el aspecto del conjunto.



Tipo de Caperuza	C (mm)	H (mm)	K (mm)	Peso (N)
CW 64	73	119	46	1,67
CW 95	105	121	46	2,16
CW 120	160	173,5	58	8,63
CW 128	165	182,5	58	8,93
CW 150	190	213,5	85	17,17

Tabla 5.14. Dimensiones principales de las caperuzas de retén [24].

La lubricación constante que proporcionan en la zona de contacto con las guías, se consigue gracias a la cavidad central rellena de grasa que pasa a estado líquido durante el funcionamiento y la recarga desde un punto o depósito de lubricación, a través de los puntos roscados de lubricación en las caperuzas.

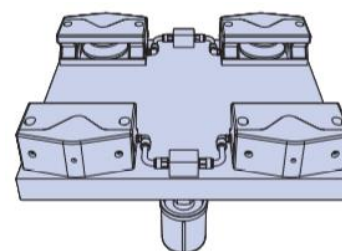
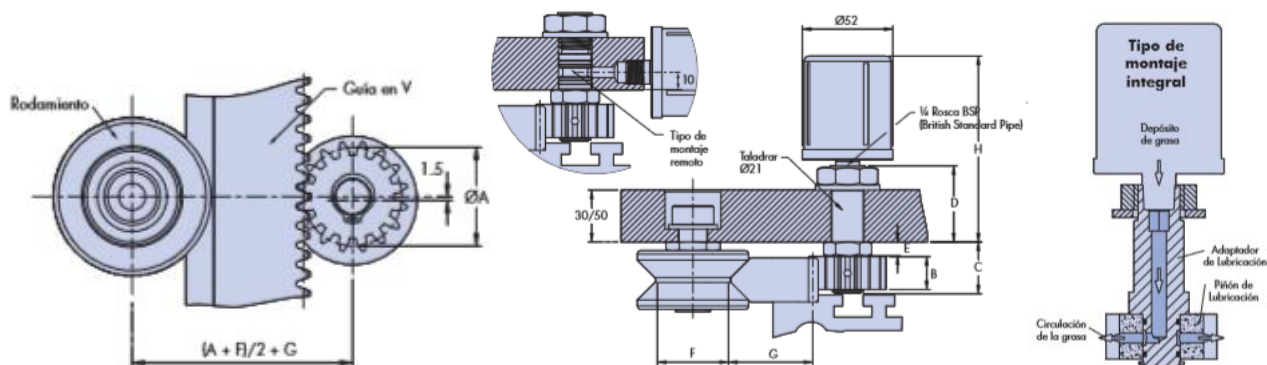


Fig. 5.11. Lubricación automática para las caperuzas [24].

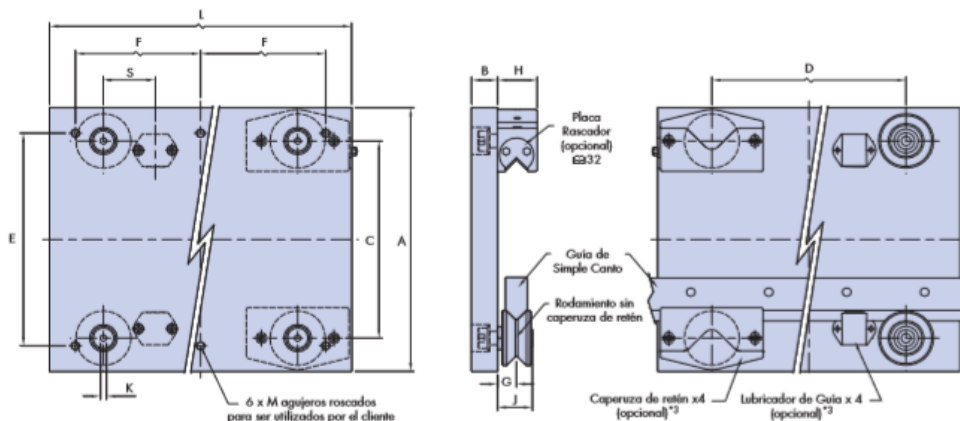
Al mismo tiempo, se puede efectuar la lubricación de la cremallera y el piñón automáticamente. Un depósito de presión relleno de grasa lubrica por medio de un piñón de plástico agujereado a los dientes de la cremallera a intervalos.



Lubricador	Módulo Cremallera (mm)	Con rodamientos	Nº Dientes piñón	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	H (mm)
HLP A 25 Helicoidal	2,5	Ø64- Ø95	16	46,2	18	30	47	150
HLP A 25 Helicoidal	2,5	Ø120	16	46,2	18	36	47	150
HLP A 40 Helicoidal	4	Ø128	16	73,9	24	40	47	150
HLP A 40 Helicoidal	4	Ø150	16	73,9	24	52	67	170

Tabla 5.15. Dimensiones principales de la lubricación automática de la cremallera [24].

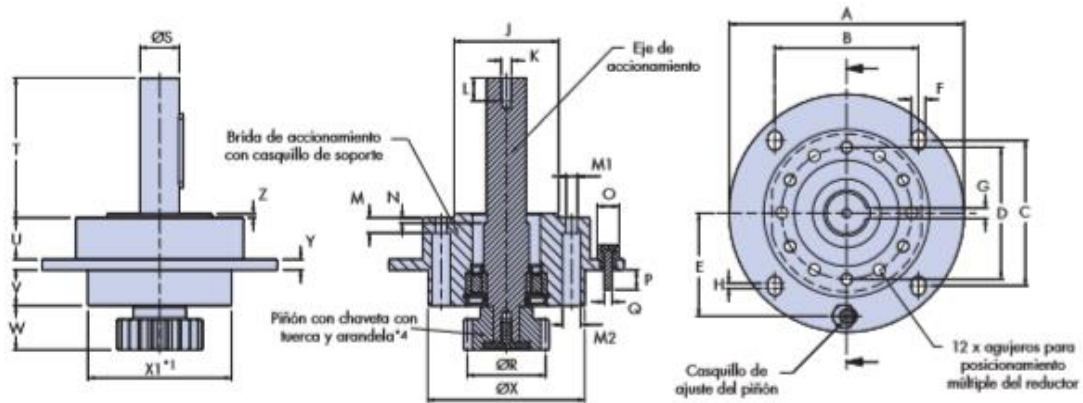
Los rodamientos van ensamblados al carro donde se apoyan o sujetan las vigas. Al igual que otros elementos, están mecanizados y fabricación de una aleación de aluminio de alta resistencia con anodizado transparente. Dispone de agujeros roscados para añadir los elementos necesarios.



Carro	A (mm)	B (mm)	H (mm)	J (mm)	L (mm)	Peso (N)
AU 64 25	390	30	46	40,5	390	137,34
AU 95 25	450	30	46	40,5	450	222,69
AU 120 33	500	30	58	50	530	362,97
AU 128 33	580	30	58	50	680	472,84
AU 150 33	630	50	85	80	710	912,33

Tabla 5.16. Dimensiones principales de los carros [24].

El accionamiento del carro se consigue mediante el ensamblaje de la brida de accionamiento que se sitúa en la cara superior del carro y conecta el accionamiento desde el motor-reductor al piñón. El elemento incorpora un rodillo con capacidad de carga elevada para hacer la función de soporte rígido al motor-reductor y al carro.



Brida accionamiento	Módulo Cremallera (mm)	Con rodamientos	Nº Dientes piñón	A (mm)	T (mm)	ØR (mm)	X1 (mm)	Peso (N)
HDF 25 Helicoidal	2,5	Ø64- Ø95	20	160	107,5	57,74	105	24,53
HDF 25 Helicoidal	2,5	Ø120	20	160	107,5	57,74	105	24,53
HDF 40 Helicoidal	4	Ø128	24	220	145	110,85	142	70,63
HDF 40 Helicoidal	4	Ø150	24	220	145	110,85	142	78,48

Tabla 5.17. Dimensiones principales del ensamblaje de la brida de accionamiento [24].

Los ensamblajes de la brida de accionamiento HDF25 Helicoidal tienen una capacidad radial dinámica del rodamiento de 38.000 N y los HDF40 Helicoidal, de 60.500N.

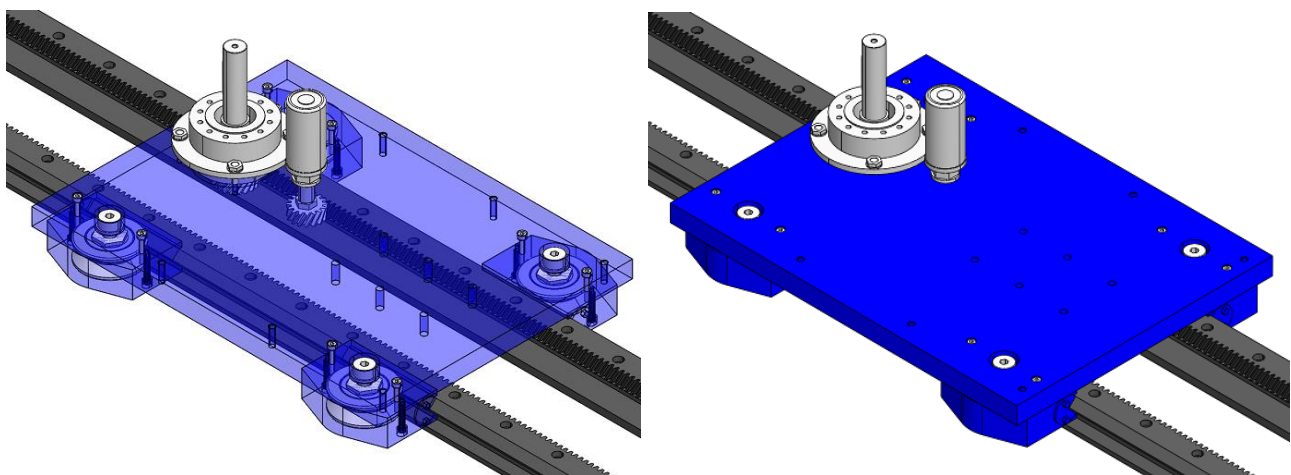


Fig. 5.12 CAD del conjunto ensamblado de los elementos de transmisión de movimiento.

5.3.1.1. Elección de la transmisión para el eje X

Contando la disponibilidad de los elementos anteriormente detallados del sistema de accionamiento y teniendo en cuenta la disposición del eje Z sobre el X, se debe considerar la carga radial máxima para la selección inicial a través de la *Tabla 5.10*.

Por tanto, con las guías de Simple Canto 25 en V con cremallera de dientes helicoidales de módulo 2,5 mm es suficiente para soportar las cargas de forma segura. El chavetero que contiene en su parte inferior será unido al Espaciador Alto 25 para asegurar que las caperuzas de retén no rocen con la superficie de la viga sobre la que se apoya el conjunto de raíles. La lubricación para la cremallera es HLP 25 Helicoidal con un piñón de 16 dientes.

- **Especificaciones técnicas de las guías**

- Material y acabado: acero de rodamiento alto en carbono, endurecido en las superficies de rodadura.
- Longitud total de la guía: 7.804 mm

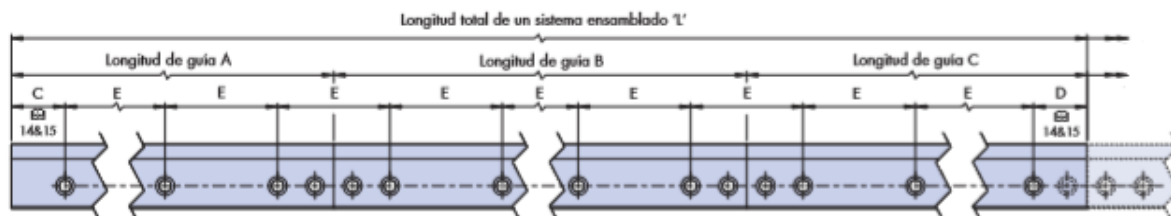


Fig. 5.13. Método de unión de las guías en V [24].

- Cremallera: dientes helicoidales con ángulo de 30° .

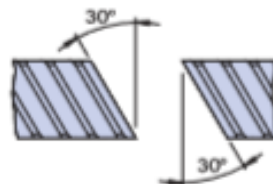


Fig. 5.14. Detalle de la cremallera helicoidal [24].

- **Especificaciones técnicas de los espaciadores**

- Material: aleación de aluminio de gran resistencia.
- Acabado: anodizado hasta un espesor de 15 μm .
- Longitud total del espaciador: 7.804 mm.

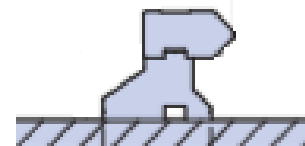


Fig. 5.15. Colocación de la guía sobre el espaciador [24].

Los rodamientos adaptables a las guías escogidas son los de diámetro 64 mm, 95 mm o 120 mm. Para el eje X, los rodamientos de 64 mm, los cuales serán recubiertos con las caperuzas de retén CW64 de lubricación incorporada, ya ofrecen los resultados deseados.

- **Especificaciones técnicas de los rodamientos y caperuzas de retén**

- Material de los rodamientos: acero de rodamiento al carbono y cromo AISI 52100, endurecido y revenido.
- Material de las caperuzas: plástico resistente a impactos.
- Escala de temperaturas: -20°C a +120°C.
- Fricción debida a las 4 caperuzas: 5 N.

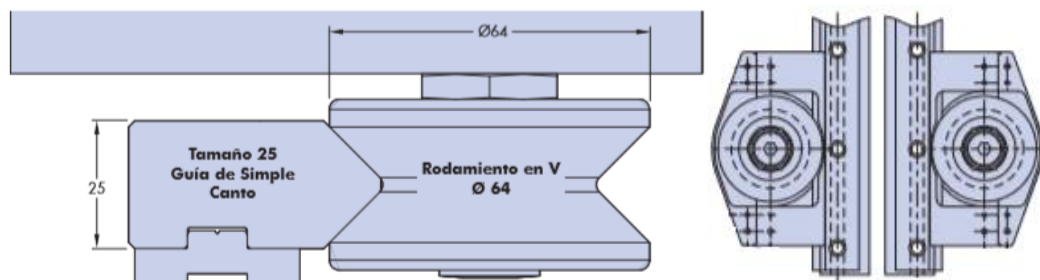


Fig. 5.16. Colocación de los rodamientos y protección mediante caperuzas de retén [24].

El accionamiento se efectúa gracias al ensamblaje de brida correspondiente, HDF 25 Helicoidal con piñón de 20 dientes y 57,74 mm de diámetro, por el tipo de guía, de rodamiento y dientes de la cremallera que se han seleccionado.

Todo ello se ensambla en el carro AU 64 25, adecuado para el repertorio de elementos escogido. El conjunto puede operar a grandes velocidades, de hasta 10 m/s.

5.3.2. Motor en eje X

Para seleccionar el motor que se ajusta más a las características deseadas, se realiza una comparativa entre los motores paso a paso y los servomotores, los cuales permiten el control de la posición. En la *Tabla 5.18.* se estudian las ventajas e inconvenientes, de manera generalizada, de los dos tipos de motor.

Característica	Paso a Paso	Servomotor
Velocidad	Baja	Alta
Control de posicionamiento	Sí	Sí
Mecanismo externo para posicionamiento	No	Sí
Aceleración y frenado	Menor	Mayor
Probabilidad de vibración y resonancia	Mayor	Menor
Rendimiento	Menor	Mayor

Tabla 5.18. Comparativa de motores.

Aunque ambos dan lugar a un posicionamiento preciso, los servomotores permiten alcanzar velocidades más elevadas con un rendimiento más adecuado. Estas dos cualidades hacen que sea mejor opción que los motores paso a paso.

Este tipo de motores, se componen de:

- Motor eléctrico que genera el movimiento a través del eje.
- Sistema de engranajes que regula la velocidad y el par.
- Potenciómetro, resistencia eléctrica, con el que se logra saber el ángulo en el cual se encuentra el eje.

Según la interacción entre su rotor físico y el campo magnético rotatorio no visible, existen dos clasificaciones: síncronos y asíncronos. Los primeros se caracterizan por la velocidad idéntica del rotor y el campo magnético. En el segundo caso, el rotor nunca llega a girar a la misma frecuencia que el campo magnético.

Para el accionamiento de los ejes X e Y de la estructura pórtico, se estudian los servomotores síncronos, por su mayor control de características, su adaptabilidad a elevadas cargas y su aplicación altamente dinámica.

El sistema de control de movimiento de un servomotor, *Encoder*, se ejecuta por envío de pulsos eléctricos, cuya duración determina el ángulo de giro. Éste puede estar o no incluido en la caja del servo. Asimismo, hay dos tipos de codificadores, los incrementales y los absolutos. Los primeros registran sólo una posición desde donde empiezan la cuenta, siendo la posición actual incremental cuando se compara con la última posición registrada por el sensor. En cambio, los segundos realizan el registro en un máximo de 4.096 rotaciones, por lo que ofrece un código diferente para cada posición.

De los productos disponibles en el mercado, los escogidos para el estudio de alternativas son los Servomotores Síncronos de *Bosch Rexroth*, que disponen de codificador óptico absoluto separado del propio motor.



Fig. 5.17. Motores Rexroth para análisis de alternativas [23].

La ecuación que permite determinar el motor apropiado para cada uno de los ejes horizontales es la que se extrae del esquema mostrado en la Fig. 5.18.

$$\Gamma_{motor} = (\Gamma_{inercia} + \Gamma_{carga}) * f \quad (Ec. 5.11.)$$

$$\Gamma_{inercia} = J_{motor} * \frac{a}{\frac{r_{piñón}}{i}} \quad (Ec. 5.12.)$$

$$\Gamma_{carga} = \frac{m \cdot a \cdot r_{piñón}}{i \cdot \eta} + \Gamma_{fric} \quad (Ec. 5.13.)$$

$$i = \frac{W_{entrada_reductor}}{W_{salida_reductor}} = \frac{W_{motor}}{W_{salida_reductor}} = \frac{W_{motor}}{\frac{v_{salida_reductor}}{r_{piñón}}} \quad (Ec. 5.14.)$$

Donde:

- Γ_{motor} : par total del motor (N·m).
- $\Gamma_{inercia}$: par de inercia del motor (N·m).
- Γ_{carga} : par del motor debido a la carga (N·m).
- f : factor de seguridad, para obtener un margen del 40%, de 1,4.
- J_{motor} : inercia del motor (kg·m²).
- a : aceleración del carro (m/s²).
- $r_{piñón}$: radio del piñón de accionamiento del motor (mm).
- i : relación de transmisión con el reductor.
- η : rendimiento del motor.
- Γ_{fric} : par de fricción (N·m).
- $W_{entrada_motor} = W_{motor}$: velocidad angular del motor (rad/s).
- $V_{salida_reductor}$: velocidad de salida del reductor (m/s).
- $W_{salida_reductor}$: velocidad angular de salida del reductor (rad/s).

Como especificaciones se tiene una velocidad de impresión igual a 20 m/min, siendo la restricción para la elección del motor. Por ello, se define como velocidad mínima de salida del reductor:

$$V_{salida_reductor} = 20 \text{ m/min} = 0,33 \text{ m/s} = 110,26 \text{ min}^{-1}.$$

5.3.2.1. Elección del motor para el eje X

A partir de las decisiones tomadas en el apartado 5.3.1. *Elementos de transmisión de movimiento en eje X*, se tiene que el diámetro del piñón de accionamiento es 57,74 mm, es decir, el radio es de 28,87 mm.

$$r_{piñón} = 28,87 \text{ mm} = 0,02887 \text{ m}$$

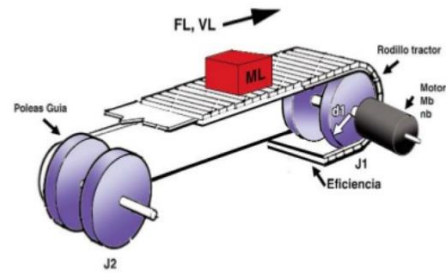


Fig. 5.18. Esquema del sistema de movimiento. Fuente: www.brushlessmotor.es

Sustituyendo las ecuaciones *Ec.5.12.* y *Ec.5.13.* en la primera, *Ec.5.11.*, y suponiendo que la relación de transmisión es $i=1$ porque no hay reductor acoplado al servomotor, la ecuación resultante queda de la siguiente forma:

$$\Gamma_{motor} = \left(J_{motor} \cdot \frac{a}{r_{piñón}} + \frac{m \cdot a \cdot r_{piñón}}{\eta} + \Gamma_{fric} \right) \cdot f \quad (Ec. 5.15.)$$

Se considera que la aceleración máxima se realiza en 1s a la velocidad indicada de 0,33 m/s. De este modo, $a = 0,33\text{m/s}^2 = 0,034g$.

Además, el rendimiento se estima en un 70% para que el motor trabaje dentro de la zona de trabajo de par nominal, sin alcanzar la zona de par máximo, la cual podría dañar el sistema.

A continuación se muestra el detalle técnico de los motores MS2N y los MSK estudiados, los cuales tiene r.p.m. máximas cercanas a la necesaria, con el fin de no sobredimensionar en exceso el motor.

Motor	Par máx. [N·m]	Par continuo [N·m]	Vel. máx. [min ⁻¹]	Inercia [kg·m ²]	Vel. Nom. [min ⁻¹]	Tipo de refrigeración
MSK 061C-0200	32	8	3100	0,000752	-	Auto-refrigeración 60K ⁸
MSK 061C-0200	32	9	3100	0,000752	-	Auto-refrigeración 100K
MSK 061C-0200	32	12	3100	0,000752	-	Ventilación forzada
MSK 070C-0150	33	13	2500	0,00291	-	Auto-refrigeración 60K
MSK 070C-0150	33	14,5	2500	0,00291	-	Auto-refrigeración 100K
MSK 070C-0150	33	19,5	2500	0,00291	-	Ventilación forzada
MSK 100C-0200	148	38	3500	0,02730	-	Auto-refrigeración 60K
MSK 100D-0200	187	48	2000	0,03500	-	Auto-refrigeración 60K
MS2N 04-D0BH	19,7	3,85	4000	0,00020	2000	Auto-refrigeración 60K
MS2N 04-D0BH	19,7	4,65	4000	0,00020	2000	Auto-refrigeración 100K
MS2N 05-D0BH	34	7,9	4000	0,00051	2000	Auto-refrigeración 60K
MS2N 05-D0BH	34	9,35	4000	0,00051	2000	Auto-refrigeración 100K
MS2N 06-E0BH	53,4	13	4000	0,00103	2000	Auto-refrigeración 60K
MS2N 06-E0BH	53,4	16,3	4000	0,00103	2000	Auto-refrigeración 100K
MS2N 10-D1BF	174	47,2	3000	0,01857	1500	Auto-refrigeración 60K
MS2N 10-D1BF	174	56	3000	0,01857	1500	Auto-refrigeración 100K

Tabla 5.19. Características técnicas principales para la selección del motor [23].

⁸ **Auto-refrigeración 60K:** el motor permite una variación de temperatura de 60K en su carcasa.

Si se compara directamente un modelo con otro, se observa que el MSK proporciona pares mayores con una velocidad de giro menor, lo cual supone una ventaja respecto al modelo MS2N. Sin embargo, éste último suele tener un tamaño más reducido.

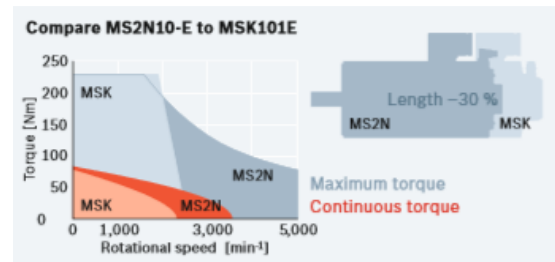


Fig. 5.19. Comparativa de los dos modelos de motor a estudiar [23].

Optando por el modelo MSK como la solución más eficiente, se muestra el cálculo para el motor MSK070C-0150. Hay que tener en cuenta que solo se dispone de datos de la fricción ocasionada por los rodamientos ensamblados al carro, por lo que se establece un factor de seguridad que compense la falta de información acerca del par de fricción del motor.

$$\Gamma_{motor} = \left(0,00291 \cdot \frac{0,33}{0,02887} + \frac{500 \cdot 0,33 \cdot 0,02887}{0,7} + (5 \cdot 0,02887) \right) \cdot 1,4 = 9,8725 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La masa estimada para el cálculo del motor se obtiene de la suma del peso total del Eje Z, de 4.414,5 N, del propio motor escogido y los elementos que se trasladan junto a ellos (aproximadamente 490,5N). Lo que supone un total de 4.905 N (500 kg).

Según al par obtenido mediante cálculo y considerando que se pretende alcanzar la velocidad de giro requerida de 110,26min⁻¹ como mínimo y de 132,31min⁻¹ como máximo, se puede comprobar que el motor MSK070C-0150 provee el par necesario. En concreto, el de auto-refrigeración 60K, ya que en régimen permanente el motor opera por debajo de la curva de su par nominal.

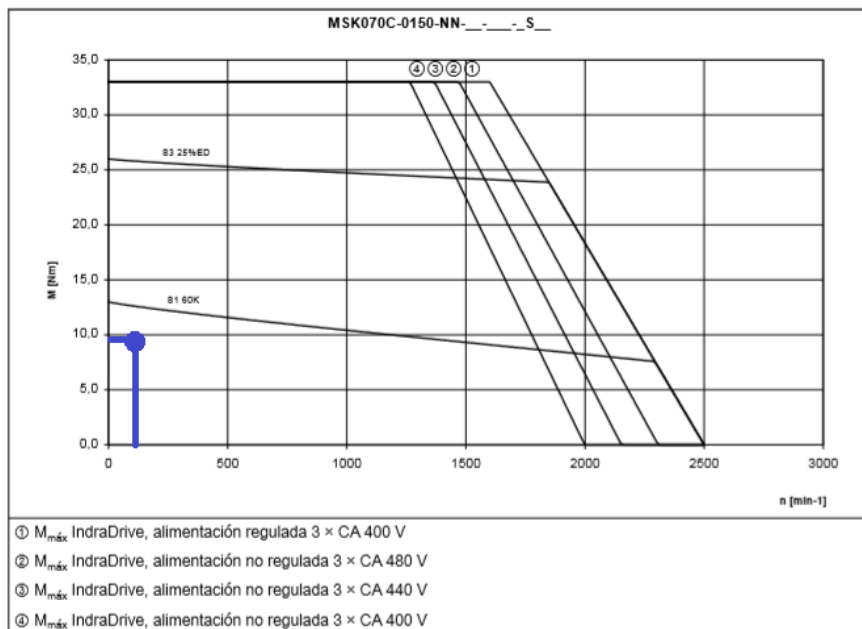


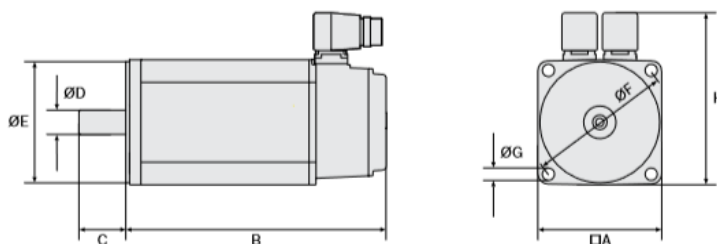
Fig. 5.20. Características de las curvas revolución-par del motor, máximas [23].

Para el par máximo, la velocidad de giro de rotura o máxima de 2.500 r.p.m. está determinada por la tensión del circuito utilizada. La alimentación del motor es trifásica de corriente alterna con un voltaje, para este caso, de 400V.

- **Especificaciones técnicas del motor:**

Descripción del motor MSK070C-150	Valores
Par de parada, M_0 (N·m)	13
Corriente de parada, I_0 (A)	4,1
Par máximo, M_{\max} (N·m)	33
Intensidad máxima, I_{\max} (A)	16,4
Número de polos	6
Momento de inercia del rotor sin freno, J_{rot} (kg·m ²)	0,00291
Revoluciones máximas, n_{\max} (min ⁻¹)	2.500
Nivel de presión de sonido, L_p (dB)	< 75
Temperatura ambiente de servicio, T_m (°C)	0 a 40
Grado de protección	IP65

Tabla 5.20. Especificaciones del motor sin freno [23].



Motor	A [mm]	B [mm]	C [mm]	ØD [mm]	ØE [mm]	ØF [mm]	ØG [mm]	H [mm]	Peso [N]
MSK 070C-0150	140	238	58	32	130	165	11	202	114,78

Tabla 5.21. Dimensiones del motor [23].

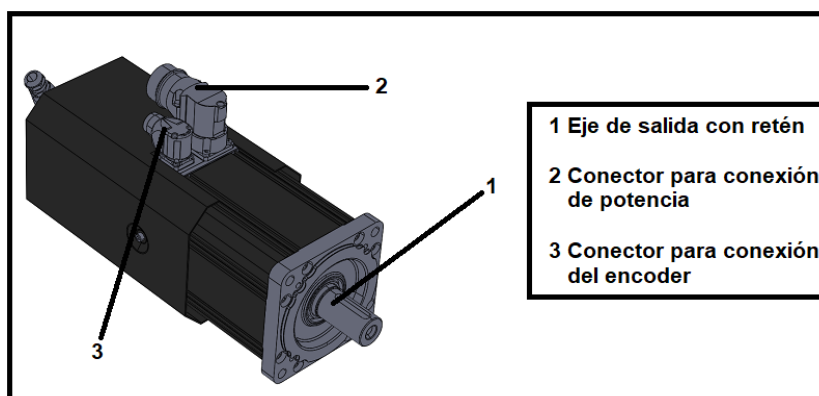


Fig. 5.21. CAD del motor con el detalle de sus partes [23].

5.3.3. Final de carrera

Para el posicionamiento es necesario proporcionar valores de posición precisos y para ello se utilizan encoders rotativos, o simplemente encoders, para determinar las posiciones. Se encargan de transformar una posición angular mecánica de un eje en una señal electrónica procesada con un sistema de control.

De los tipos de encoder más usuales, los motores MSK escogidos disponen de encoder absoluto integrado, es decir, son capaces de ofrecer valores de posición únicos desde el momento en que se encienden y también justo después de un corte eléctrico, a través de la lectura del código de salida. En consecuencia, no pierden la posición real al cortarles el suministro, manteniendo su posición actualizada y disponible, sin necesidad de buscar de nuevo el punto cero, como haría un encoder incremental.

Por esta razón, es prescindible el uso de amortiguadores de impacto como unidad de paro del movimiento a final de las guías. De modo que se dota al mecanismo de unos topes de goma, los cuales se ubican en línea con los carros ensamblados al sistema de transmisión de movimiento, para proteger el final de carrera.

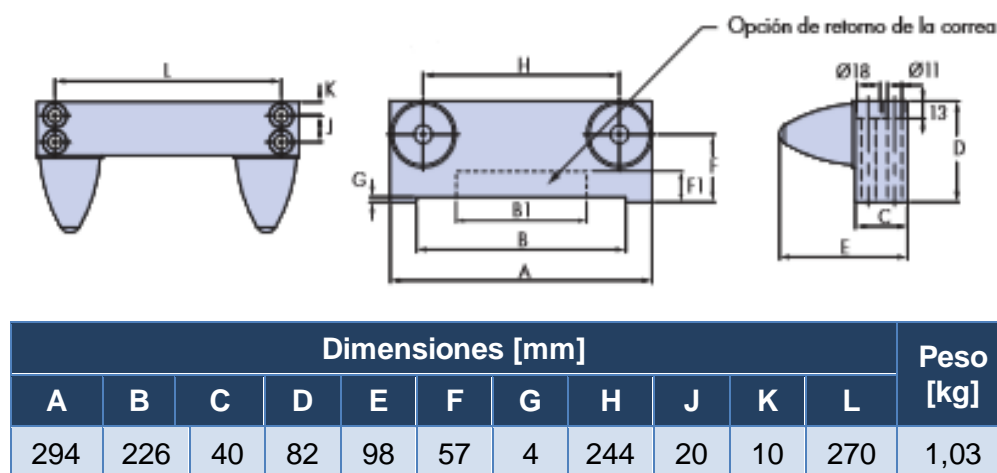


Tabla 5.22. Dimensiones de los topes de goma. Fuente: www.hepcotion.com/es.

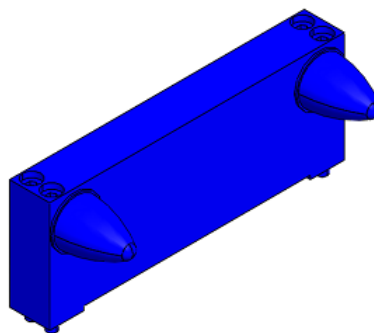


Fig. 5.22. CAD de los topes de goma de Hepco Motion.

5.4. Eje Y

El eje Y se compone de cuatro tramos de perfil tubular cuadrado de acero, unidos de manera que sus ejes sean coincidentes, dos en cada lado del perfil horizontal en X. La longitud de cada tramo es de 9,5 m.

Sobre ellos se ubica la unión de guías y espaciadores de 17.980 mm de longitud, por donde corren los rodamientos de las mesas, del mismo modo que en el eje X. El movimiento lineal, generado por ambos motores MSK100D-200, situados sobre los carros, finaliza en los topes de goma de los extremos de las guías. La disposición de todos los elementos, encargados de la transmisión de movimiento, se sitúan de forma simétrica en los dos ejes Y para evitar que, durante la traslación del perfil en X de 8m de luz aproximadamente, los carros queden clavados, impidiendo el movimiento de la impresora.

Al igual que en el eje transversal, estos también constan de una placa soporte en forma de L que marca el camino de la cadena portacables E-Chain. La cadena portacables descansa sobre la misma bandeja.

Seguidamente se muestra la ubicación de cada una de las piezas que conforman el eje Y.

Id.	Cantidad	Descripción
27	4	Guías lineales con cremallera
28	4	Espaciadores lineales
29	2	Motores MSK100D-200
30	4	Unidades amortiguadoras con topes de goma
31	2	Mesa del carro
32	8	Rodamientos de doble hilera de bolas
33	8	Caperuzas de retén lubricadoras
34	2	Lubricadores automáticos de las cremalleras
35	1	Cadena portacables IGUS del eje Y
36	1	Bandejas de soporte de la cadena IGUS en eje Y
37	1	Unión de la cadena portacables IGUS con el carro del eje Y
38	4	Perfiles horizontales 500mm x 500mm x 8mm de longitud total 9.500mm

Tabla 5.23. Listado de piezas que componen el eje Y.

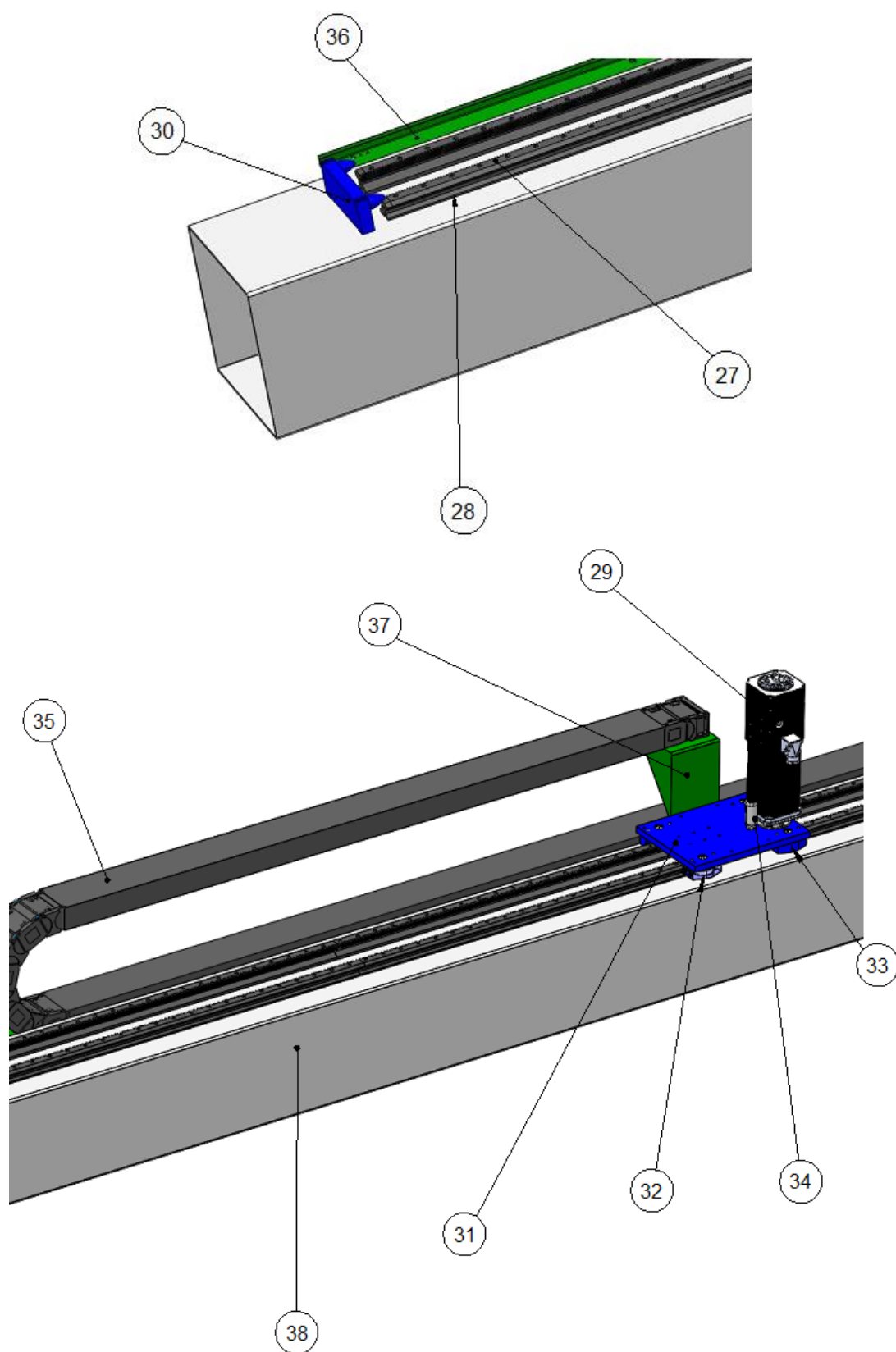


Fig. 5.23. Detalle del Eje Y.

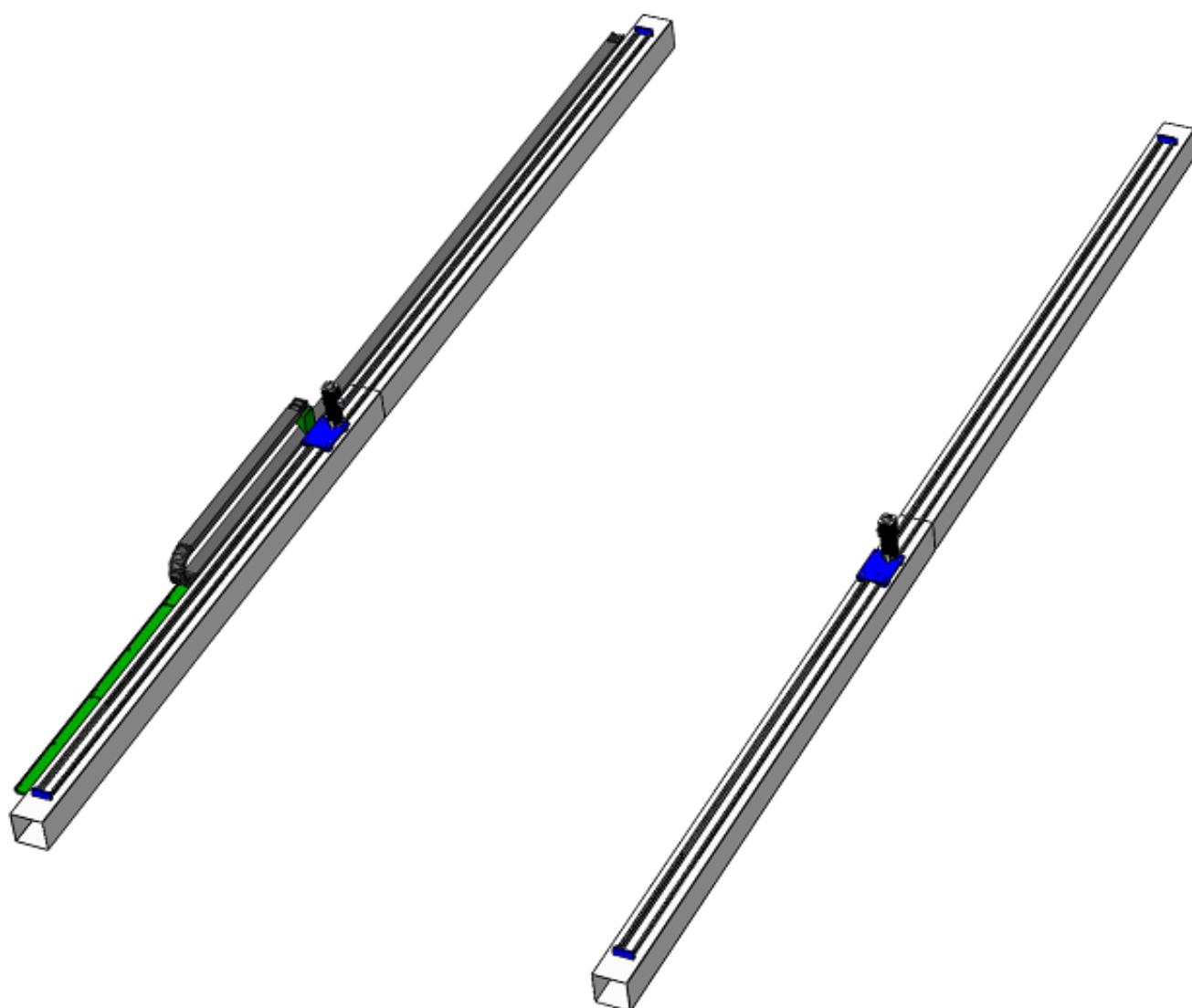


Fig. 5.24. CAD completo del Eje Y.

5.4.1. Elementos de transmisión de movimiento en eje Y

De mismo modo que se ha realizado el estudio para el eje X, a partir del apartado 5.3.1. *Elementos de transmisión de movimiento en eje X*, también se extrae la elección del sistema de transmisión para el eje Y.

Para una carga aproximada de 4.414,5 N correspondiente al eje Z y una de 11.937,1 N del eje X, teniendo en cuenta la ubicación y la repartición de carga entre los dos ejes Y a estudiar, se considera la carga axial máxima como criterio de selección a través de la *Tabla 5.10*.

De este modo, las guías de Simple Canto 25 en V con cremallera de dientes helicoidales de módulo 2,5 mm y con ángulo de 30 ° son adecuadas para soportar las cargas, repartidas entre los dos ejes en Y. Como se ha descrito anteriormente, el chavetero que contiene en su parte inferior será unido al Espaciador Alto 25 para evitar el roce de las caperuzas de retén con la superficie de la viga. La longitud total tanto de la guía como del espaciador es de 17,98 m.

Los rodamientos adaptables a las guías escogidas y funcionales para el eje Y son los de 95mm de diámetro, los cuales están cubiertos por las caperuzas de retén CW95 de lubricación incorporada. También se lubrica la cremallera a través del dispositivo HLP 25 Helicoidal con un piñón de 16 dientes. El accionamiento se efectúa mediante el ensamblaje de brida que le corresponde según las elecciones anteriores y se trata del HDF 25 Helicoidal con piñón de 20 dientes y 57,74 mm de diámetro. Finalmente, los elementos citados se ensamblan en el carro AU 95 25.

5.4.2. Motor en eje Y

A partir de las decisiones tomadas en el apartado 5.3.2. *Motor en eje X*, siguiendo los pasos tomados para dicho eje y teniendo en consideración los elementos de transmisión del eje Y, se mantiene el diámetro del piñón de accionamiento en 57,74 mm.

Salvaguardando una relación de transmisión de $i=1$ porque no hay reductor acoplado al servomotor, así como continuando con una aceleración de $a = 0,33 \text{ m/s}^2 = 0,034g$ y un rendimiento del 70%, la ecuación sigue siendo la *Ec.5.15*.

Optando por el modelo MSK como anteriormente, se muestra el cálculo para el motor MSK100D-0200, a partir de una masa estimada de 1.500 kg (Eje Z, Eje X y elementos que con ellos se mueven).

$$\Gamma_{\text{motor}} = \left(J_{\text{motor}} \cdot \frac{a}{r_{\text{piñón}}} + \frac{m \cdot a \cdot r_{\text{piñón}}}{\eta} + \Gamma_{\text{fric}} \right) \cdot f = \left(0,0350 \cdot \frac{0,33}{0,02887} + \frac{1.500 \cdot 0,33 \cdot 0,02887}{0,7} + (5 \cdot 0,02887) \right) \cdot 1,4 = 29,6376 \text{ N} \cdot \text{m}$$

En la fricción se contabiliza la ocasionada por los rodamientos ensamblados al carro.

Según el par obtenido mediante cálculo y considerando que se pretende alcanzar una velocidad de giro mínima de $110,26 \text{ min}^{-1}$ y máxima de $132,31 \text{ min}^{-1}$, el motor MSK100D-200 con auto-refrigeración 60K es capaz de suministrar el par necesario. Del mismo modo que para el eje X, la alimentación de los dos motores iguales del eje Y es trifásica de corriente alterna con un voltaje de 400V.

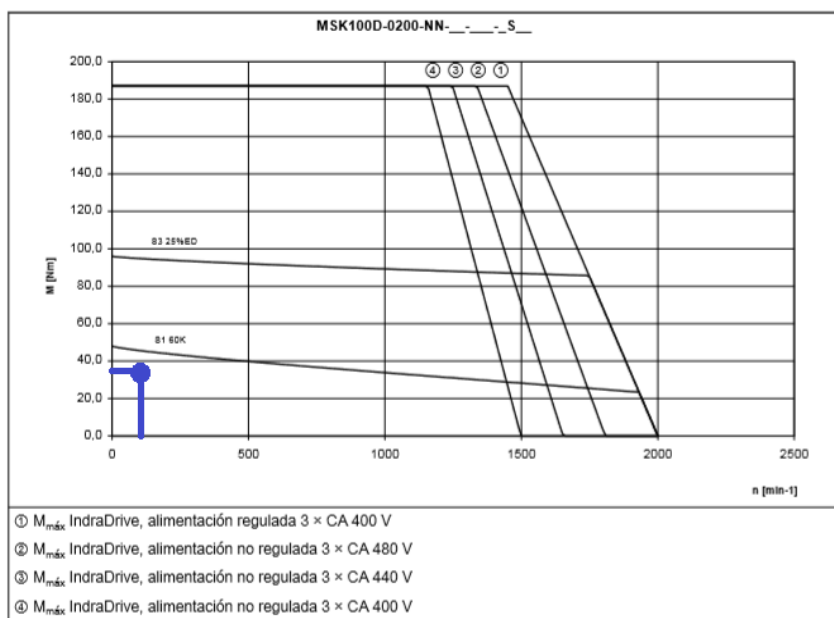


Fig. 5.25. Características de las curvas revolución-par del motor, máximas [23].

- Especificaciones técnicas del motor:**

Descripción del motor MSK100D-200	Valores
Par de parada, M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$)	48
Corriente de parada, I_0 (A)	13
Par máximo, $M_{\text{máx}}$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	187
Intensidad máxima, $I_{\text{máx}}$ (A)	58,5
Número de polos	4
Momento de inercia del rotor sin freno, J_{rot} ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0,0350
Revoluciones máximas, $n_{\text{máx}}$ (min^{-1})	2.000
Nivel de presión de sonido, L_p (dB)	< 75
Temperatura ambiente de servicio, T_m ($^{\circ}\text{C}$)	0 a 40
Grado de protección	IP65

Tabla 5.24. Especificaciones del motor sin freno [23].

Motor	A [mm]	B [mm]	C [mm]	ØD [mm]	ØE [mm]	ØF [mm]	ØG [mm]	H [mm]	Peso [N]
MSK 100D-200	192	502	60	32	130	215	14	262	549,36

Tabla 5.25. Dimensiones del motor [23].

Se acopla el motor en cada uno de los ejes Y, es decir, en cada extremo del eje X, para evitar que este último eje quede clavado en la ejecución del movimiento.

5.4.3. Cálculo de deformaciones

Se realizan cálculos de flexión para los ejes X e Y con el objetivo de encontrar la sección que garantice el soporte de las piezas que componen ambos ejes y que, al mismo tiempo, éstos presenten la mínima flexión y su peso sea el menor posible. Para ello, se establece una deformación máxima de las guías igual a 40 mm.

A continuación, se muestran las características técnicas y el criterio de elección del perfil, junto los cálculos de comprobación de la flecha.

- **Características técnicas:** del perfil tubular cuadrado, proporcionado por el proveedor Protubsa.
 - Material: acero estructural al carbono S275J0H con límite elástico ≥ 275 MPa, resiliencia de 27J ensayada a 0°C y resistencia a la rotura de 430-560 MPa. Este material se usa comúnmente para para maquinaria, estructuras, puentes..., por lo que resulta apropiado para la impresora.
 - Densidad: 7850 kg/m³
 - Módulo de Young: $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa.

En la *Tabla 5.26.* y *Tabla 5.27.* se especifican las tolerancias dimensionales en función del acabado, las cotas de la sección y el peso del perfil.

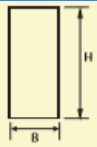
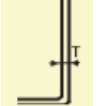
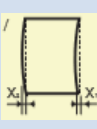
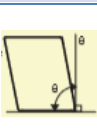

Característica		Acabado en caliente	Acabado en frío
Dimensión exterior		$\pm 1\%$ con un mínimo de $\pm 0,5$ mm	$100 \text{ mm} \leq H, B \leq 200 \text{ mm} \pm 0,8\%$ $H, B > 200 \text{ mm} \pm 0,6\%$
Espesor T		-10%	$\leq 5 \text{ mm} \pm 10\%$ $> 5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
Concavidad / Convexidad		1%	0,8% máx. con 0,5 mm mínimo
Encuadre de los lados		$90^\circ \pm 1\%$	$90^\circ \pm 1\%$
Rectitud		0,2% del largo total	0,15% del largo total

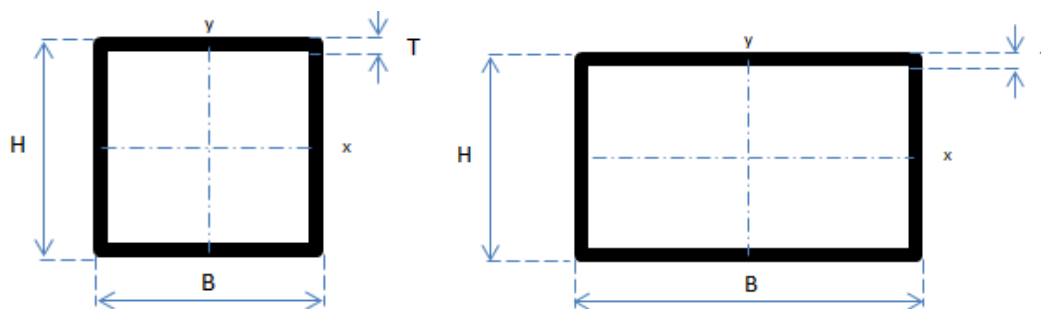
Tabla 5.26. Tolerancias dimensionales de los perfiles. Fuente: www.protubsa.com.

Los perfiles que componen la impresora son fabricados con acabado en frío por sus múltiples ventajas frente al acabado en caliente, a pesar de ser menos económicos.

Entre las superioridades, destacan:

- Mejor acabado superficial.
- Espesor regular y tolerancias menores.
- Mayor dureza.
- Propiedades en la dirección deseada.

Dado el tipo de conformado del perfil, algunos de los valores del momento de inercia y masa de la viga, son:



Dimensiones H x B (mm x mm)	Espesor T (mm)	I_{y-y} (mm ⁴)	I_{x-x} (mm ⁴)	Peso (kg/m)
250 x 250	8	72.292.048,8	72.292.048,8	59,065
250 x 250	10	87.066.739,3	87.066.739,3	72,66
300 x 200	8	93.892.737,5	50.416.669,7	59,06
300 x 200	10	113.126.989,4	60.577.285,5	72,66
300 x 250	8	110.949.804,1	84.009.115,4	65,34
300 x 250	10	134.160.322,8	101.475.072,6	80,51
350 x 250	8	160.012.869,1	95.726.182,1	71,63
350 x 250	10	194.074.702,6	115.883.406,0	88,36
400 x 200	8	189.744.177,1	65.170.803,1	88,36
400 x 200	10	230.026.545,4	78.643.952,2	103,67
400 x 300	8	251.218.310,5	162.121.004,1	84,19
400 x 300	10	306.093.212,0	197.260.322,8	104,06
300 x 300	8	128.006.870,8	128.006.870,8	71,63
300 x 300	10	155.193.656,1	155.193.656,1	88,36
400 x 400	8	312.692.443,8	312.692.443,8	96,75
400 x 400	10	382.159.878,7	382.159.878,7	119,76
450 x 450	8	449.663.194,8	449.663.194,8	109,31
450 x 450	10	550.999.184,5	550.999.184,5	135,46
500 x 500	8	621.719.255,4	621.719.255,4	121,87
500 x 500	10	763.409.286,6	763.409.286,6	151,16

Tabla 5.27. Momento de inercia y masa según dimensiones de la sección. Fuente: www.protubsa.com.

- **Selección del perfil:**







Perfil	Rendimiento Geométrico
	$R_g=1/3$; Sección rectangular maciza
	$R_g=1/4$; Sección circular maciza
	$R_g=1/6$; Sección romboidal
	$R_g=1/2$; Anillo circular y perfiles tubulares rectangulares/cuadrados
	$R_g=3/5$; Perfil de acero laminado en U y carriles de ferrocarril
	$R_g=2/3$; Perfil de acero laminado en doble T

Tabla 5.28. Rendimientos geométricos de las secciones [21].

Primeramente, se ha escogido el material para el diseño de la estructura, siendo el acero una opción factible. Por la envergadura de la impresora y por la flexibilidad que debe presentar para su transporte y montaje/desmontaje continuos, los otros materiales como el aluminio, el plástico o la madera, no reúnen las características necesarias.

El aluminio es un buen candidato por su baja densidad, pero para conseguir la rigidez de la que se precisa sería necesaria una sección de perfil mucho mayor respecto a la del acero. Esto implica un mayor volumen de la estructura. Además, al utilizarse un sistema de transmisión de movimiento de acero, la diferencia de coeficientes de dilatación térmica entre los dos materiales perjudicaría a la estructura.

Por otro lado, el plástico, a pesar de ser también un material más ligero que el acero, no es candidato apropiado por su mayor deformabilidad y falta de rigidez frente a elementos muy pesados. Igualmente, las propiedades de la madera dependen de la dirección de las fibras y ésta, además, deforma con el paso del tiempo. De esta manera, la opción más acertada es el acero por su disponibilidad, por su coste asequible y su adaptación en las construcciones.

Posteriormente, para hacer una criba inicial de secciones adecuadas, se estudian los perfiles según el rendimiento geométrico⁹, R_g , de la sección. Como lo deseable es que sea próximo a la unidad, el estudio se centra únicamente en los perfiles de doble-T ($R_g=2/3$) y las secciones tubulares rectangulares, cuadradas y circulares ($R_g=1/2$). El resto de perfiles de la *Tabla 5.28.* son descartados por el motivo anterior.

⁹ **Rendimiento geométrico:** característica geométrica de la sección, siempre inferior a la unidad. Define el aprovechamiento del material, siendo el ideal el que tenga el material dispuesto a la mayor distancia del eje neutro, cuando trabaje a flexión.

Dado que se precisa de superficies planas para poder apoyar con estabilidad suficiente una viga sobre otra, además de otros elementos que van a permitir el movimiento de la estructura, la sección tubular circular también se descarta como potencial candidato.

En un primera instancia, parece que las secciones doble-T son mejores que la tubular rectangular/cuadrada, por su mayor rendimiento. No obstante y tras realizar un análisis de las dimensiones necesarias de los perfiles en los ejes horizontales X e Y, estudiando además la disposición de éstos en la estructura y la de los elementos de transmisión de movimiento, las secciones IPE, IPN y HEB resultan eliminadas de la selección, quedando como elección final las tubulares rectangulares/cuadradas.

- **Cálculo de la flecha:** se tiene en cuenta tanto la rectitud, la deformación debida por el propio peso de la viga como la del peso de las piezas que debe soportar.

- Deformación debida al peso propio de la guía:

$$\Delta l_1 = \frac{5 \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{Q \cdot g \cdot L}{1000} \quad (\text{Ec. 5.16.})$$

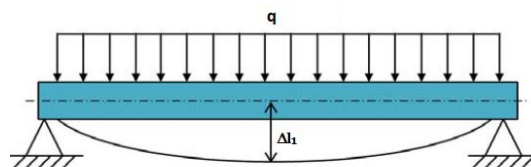


Fig. 5.26. Esquema de la flecha producida por el propio peso.

- Deformación debida al peso de los elementos que soporta:

$$\Delta l_2 = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (\text{Ec. 5.17.})$$

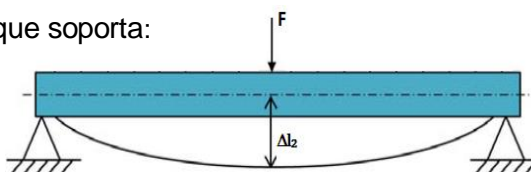


Fig. 5.27. Esquema de la flecha producida por una fuerza externa.

Donde:

- Δl_1 y Δl_2 : flexión máxima debida al peso propio y al peso de los elementos sobre el eje, respectivamente (mm).
- **Q**: masa del eje (kg/m).
- **g**: gravedad, considerada $9,81 \text{ m/s}^2$.
- **L**: longitud del eje (mm).
- **E**: módulo de Young, establecido en $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$.
- **I**: inercia de la guía (mm^4).
- **F**: carga sobre el eje (N).

Como ejemplo de cálculo de la flecha máxima, a partir de la flexión máxima en los ejes X e Y, se muestra el resultado correspondiente a una viga cuadrada de 400 mm de lado y espesor de 8 mm para el eje X y otra de 500 mm de lado y espesor de 8 mm para el eje Y.

$$\Delta l_{\text{máx}} = \Delta l_{\text{máx X}} + \Delta l_{\text{máx Y}} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

$$\Delta l_{\text{máx X}} = \Delta l_{1 \text{ X}} + \Delta l_{2 \text{ X}} \quad (\text{Ec. 5.19.})$$

$$\Delta l_{\text{máx Y}} = \Delta l_{1 \text{ Y}} + \Delta l_{2 \text{ Y}} \quad (\text{Ec. 5.20.})$$

Dónde:

- $\Delta l_{\text{máx}}$: deflexión máxima (mm).

En el **Eje X**, la longitud escogida para la viga es de 9 m y la carga que ocasionan los elementos que soporta se estima en 7.900 N. Dicha carga se divide en la masa del conjunto del eje Z, considerado al alza en 4.414,5 N, la masa de los elementos de transmisión de movimiento (guías, espaciadores, motor y carro) junto el montaje de la cadena portacables del propio eje X, establecida en 2.782,37 N, el peso estimado en 703,13 N de la manguera de hormigón sobre dicho eje, y otros.

$$F = 7.900 \text{ N} \quad Q = 96,745 \text{ kg/m} = 96,745 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mm} \quad I = I_y = I_x = 3,127 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{1X} &= \frac{5 \cdot 96,745 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 9.000^4}{384 \cdot 210.000 \cdot 3,127 \cdot 10^8} = 1,235 \text{ mm} \\ \Delta l_{2X} &= \frac{7.900 \cdot 9.000^3}{48 \cdot 210.000 \cdot 3,127 \cdot 10^8} = 1,827 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \Delta l_{\text{máx } X} = \Delta l_{1X} + \Delta l_{2X} = 3,062 \text{ mm}$$

En el **eje Y**, la longitud máxima suspendida entre soportes es de 9,5 m y la carga máxima que soporta uno de los ejes en Y es de 16.800 N. Si se desglosa, se tiene en el peor de los casos una carga fija de aproximadamente 11.600 N (carro de eje Y, motor de eje Y, guías de eje Y, eje Z, peso de la manguera sobre el eje Y, etc.) y 10.400 N de carga a repartir entre los dos ejes Y, es decir, 5.200 N por cada uno (peso de la viga en X, guías en X, etc.).

$$F = 16.800 \text{ N} \quad Q = 121,865 \text{ kg/m} = 121,865 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mm} \quad I = I_y = I_x = 6,217 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{1Y} &= \frac{5 \cdot 121,865 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 9.500^4}{384 \cdot 210.000 \cdot 6,217 \cdot 10^8} = 0,971 \text{ mm} \\ \Delta l_{2Y} &= \frac{16.800 \cdot 9.500^3}{48 \cdot 210.000 \cdot 6,217 \cdot 10^8} = 2,298 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \Delta l_{\text{máx } Y} = \Delta l_{1Y} + \Delta l_{2Y} = 3,270 \text{ mm}$$

En definitiva, quedará una deformación total de: $\Delta l_{\text{máx}} = \Delta l_{\text{máx } X} + \Delta l_{\text{máx } Y} = 3,062 + 3,270 = 6,332 \text{ mm}$

El proveedor indica que la rectitud a aplicar en los perfiles supone un 0,15% de la longitud del mismo. Este fenómeno sólo es aplicable al eje Y, ya que en el eje X las guías por donde circula el carro están atornilladas en el lateral del perfil y ajustando el atornillado es posible compensar la rectitud de la viga. Sin embargo, en el eje Y, las guías están atornilladas en la superficie superior, viéndose directamente afectadas. Si bien es cierto que podría compensarse mediante pletinas que nivelen las guías.

$$\text{Rectitud}_Y = \frac{0,15}{100} \cdot 9.500 = 14,25 \text{ mm}$$

$$\text{Planitud total} = \Delta l_{\text{máx}} + \text{Rectitud}_X = 6,332 + 13,5 = 19,832 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \quad \checkmark$$

La deformación máxima calculada se corresponde con la flexión en la dirección del eje Z y considerando una aceleración igual a la gravedad, de 9,81 m/s². En realidad, parte de las deformaciones serán inferiores ya que la aceleración de algunos elementos es menor.

5.5. Estructura soporte

Se configura por los elementos que actúan de soporte para el resto de los componentes como son los tres ejes de movimiento y los dispositivos auxiliares.

El estudio para obtener el perfil más adecuado ha llevado a la conclusión de que se debe dar prioridad a una sección que permita conseguir inercias parecidas en sus dos ejes de “flexión” ($I_z \approx I_y$). El motivo se centra en que la estructura soporte se pre-dimensiona a partir del pandeo que sufren los pilares de sección constante sometidos a compresión. Por consiguiente, no cabe duda que las secciones tubulares rectangulares y cuadradas son la mejor opción.

Por tanto, la estructura soporte está formada por 6 perfiles estructurales tubulares de sección rectangular de 300 mm x 250 mm, por 2 de 350 mm x 250 mm y por 8 de 200 mm x 200 mm. Todos ellos son del mismo acero que el de los ejes X e Y.

Los 8 perfiles iguales constituyen los apoyos auxiliares de los pilares situados en los extremos. Estos apoyos otorgan a la estructura de rigidez y perpendicularidad.

Como la totalidad de la estructura debe ser de fácil montaje y desmontaje, se ensamblan los perfiles mediante uniones atornilladas a partir de placas de acero con 10 mm de espesor, soldadas a los correspondientes elementos a unir. A la par, se dota a los pilares de placas bases que faciliten el anclaje regulable a la superficie donde será ubicada la impresora 3D. En este caso, las placas bases de acero tienen un espesor de 15 mm.

Seguidamente, se enumeran los elementos que forman parte de la estructura soporte, referenciándolos con el fin de mostrar su situación espacial.

Ref.	Cantidad	Tipo de Elemento
39	6	Pilares 300 mm x 250 mm x 8 mm y de longitud 7.035 mm
40	2	Travesaños 350 mm x 250 mm x 8 mm y de longitud 8.250 mm
41	8	Apoyos auxiliares 200 mm x 200 mm x 8 mm y de longitud 4.630 mm
42	8	Placas de unión 600 mm x 600 mm x 10 mm
43	8	Placas de unión de 550 mm x 200 mm x 10 mm
44	4	Placas de unión de 550 mm x 250 mm x 10 mm
45	2	Plazas de unión en U 650 mm x 500 mm x 300 mm y espesor 10 mm
46	6	Placas base 600 mm x 600 mm x 15 mm
47	8	Placas base 340 mm x 340 mm x 15 mm

Tabla 5.29. Listado de piezas que componen la estructura soporte.

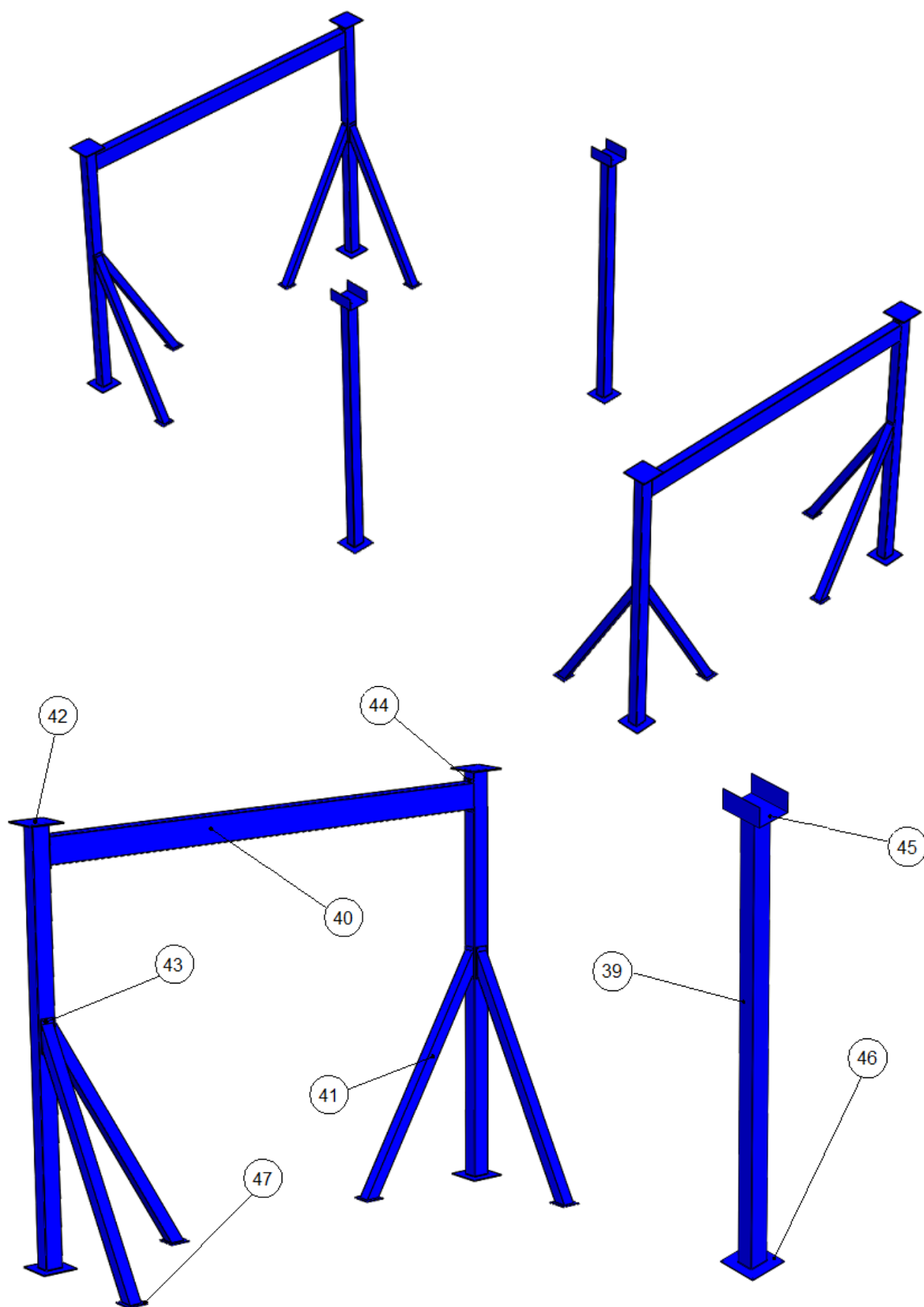


Fig. 5.28. CAD completo y detalle de la estructura soporte.

5.5.1. Dimensionamiento de los travesaños en eje X

Acorde con el resto de la impresora y con el fin de otorgar de rigidez a la misma, se añaden dos travesaños en la dirección del eje X, que se basan en un perfil tubular rectangular de 350 mm x 250 mm con un espesor de 8 mm y una largura de 8,25 m.

El motivo por el cual se ha seleccionado esta sección es la reducida deformabilidad que presenta, no superando los 20 mm si se contempla la rectitud. Al considerar el propio peso y una carga estimada de 650 N por el posible paso de la manguera con el material a extruir, que en este caso es hormigón, la máxima deformación sufrida por un travesaño según el procedimiento anterior de cálculo de flecha es de 15,029 mm.

$$F = 650 \text{ N}$$

$$Q = 71,6253 \text{ kg/m} = 71,625 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mm}$$

$$I_y = 16,001 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 9,572 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{1 \text{ Xaux}} &= \frac{5 \cdot 71,625 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 8,250^4}{384 \cdot 210.000 \cdot 9,572 \cdot 10^8} = 1,261 \text{ mm} \\ \Delta l_{2 \text{ Xaux}} &= \frac{650 \cdot 8,250^3}{48 \cdot 210.000 \cdot 16,001 \cdot 10^8} = 0,226 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \Delta l_{\text{máx Xaux}} = \Delta l_{1 \text{ Xaux}} + \Delta l_{2 \text{ Xaux}} = 1,488 \text{ mm}$$

$$\text{Rectitud}_{\text{Xaux}} = \frac{0,15}{100} \cdot 8,250 = 12,375 \text{ mm}$$

$$\text{Planitud total} = \Delta l_{\text{máx Xaux}} + \text{Rectitud}_{\text{Xaux}} = 1,261 + 12,375 = 13,636 \text{ mm} < 20 \text{ mm} \quad \checkmark$$

Además, uno de sus lados coincide con una de las cotas de la sección de los pilares, lo que permite una unión entre ambos eficaz.

Estos travesaños, del mismo acero que los ejes X e Y, impiden que los carros que circulan por las guías de los ejes Y queden clavados por la falta de paralelismo entre ambos. Además, dotan a los pilares de los extremos de mayor esbeltez durante el movimiento de la impresora.

5.5.2. Dimensionamiento a pandeo de los pilares

Para comprobar a pandeo una estructura metálica sometida a compresión se emplea el procedimiento descrito según el Documento Básico de Seguridad Estructural - Acero del Código Técnico de la Edificación, DB SE-A CTE [25], para perfiles tubulares de sección circular, cuadrada y rectangular de acero S275 con sección constante.

Las propiedades exactas de este tipo de acero son:

- Tensión de límite elástico, f_y : 275 N/mm², para espesores menores de 16 mm.
- Tensión de rotura, f_u : 430 N/mm², para espesores $t < 40$ mm.
- Módulo de Elasticidad, E : 210.000 N/mm².
- Módulo de Rigidez, G : 81.000 N/mm².
- Coeficiente de Poisson, ν : 0,3
- Coeficiente de dilatación térmica, α : $1,2 \cdot 10^{-5}$ (°C)⁻¹.
- Densidad, ρ : 7.850 kg/m³.

En primer lugar, se realiza un pre-dimensionamiento a partir de la esbeltez reducida¹⁰ $\bar{\lambda}$, que para un elemento estructural se limita a un valor de 2.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (\text{Ec. 5.21.})$$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \cdot E \cdot I \quad (\text{Ec. 5.22.})$$

$$L_k = \beta \cdot L \quad (\text{Ec. 5.23.})$$

Siendo:

- **A**: área de la sección transversal (mm²).
- **N_{cr}**: carga crítica de Euler (N).
- **L_k**: longitud de pandeo de los pilares (mm).
- **β**: factor de pandeo.
- **L**: longitud real de la barra (mm).





Forma de pandeo (línea de puntos)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Factor de pandeo, β	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Condiciones de la articulación	 Rotación y Traslación impedida  Rotación libre y Traslación impedida  Rotación impedida y Traslación libre  Rotación libre y Traslación libre					

Tabla 5.30. Factores de pandeo en función de las articulaciones de los extremos.

Considerando uno de los peores casos, es decir, un extremo del pilar empotrado y el otro con traslación libre (caso *f* de la *Tabla 5.30.*), por tanto, pudiéndose desplazar únicamente el extremo superior, el factor de pandeo es igual a $\beta=2$.

Así, $L_k = 2 \cdot 7.035 \text{ mm} = 14.070 \text{ mm}$

Al combinar las ecuaciones anteriores con la del radio de giro¹¹, i , de la sección y añadiendo la limitación de la esbeltez reducida comentada, se obtiene la inecuación que permitirá seleccionar el primer perfil con posible validez para el diseño de los pilares de la estructura soporte.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (\text{Ec. 5.24.})$$

$$i > \frac{L_k}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (\text{Ec. 5.25.})$$

Como pueden pandear en los dos planos, se estudia el eje débil por ser el limitante.

$$i > \frac{L_k}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{14.070}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{275}{210.000}} = 81,035 \text{ mm}$$

De las secciones comunes, el perfil hueco rectangular 300 mm x 200 mm con espesor de 8 mm es el primero que cumple con $i=81,85 \text{ mm}$. Pero la similitud es muy ajustada, por lo que se escoge el siguiente perfil que cumpla. Se trata del de sección 300 mm x 250 mm con espesor de 8 mm e $i=10,045 \text{ mm}$ ($A=83,24 \text{ cm}^2$, $I_y=11.094,98 \text{ cm}^4$, $I_z=8.400,91 \text{ cm}^4$).

Para comprobar que el perfil escogido es el correcto se debe verificar que la resistencia de las barras a compresión, $N_{c,Rd}$, no sea superior a la resistencia plástica de la sección bruta, $N_{pl,Rd}$, y sea menor que la resistencia última de la barra a pandeo, $N_{b,Rd}$ [25].

El pandeo puede producirse alrededor de los ejes y-y y x-x, por lo que es necesario comprobar la resistencia a pandeo en los dos posibles planos. De las ecuaciones *Ec.5.21.* y *Ec.5.22.* se obtiene la esbeltez reducida del perfil elegido.

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \cdot E \cdot I_y = \left(\frac{\pi}{14.070}\right)^2 \cdot 210.000 \cdot 110.949.804,1 = 1.161.602,09 \text{ N}$$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \cdot E \cdot I_x = \left(\frac{\pi}{14.070}\right)^2 \cdot 210.000 \cdot 84.009.115,4 = 879.543,37 \text{ N}$$

¹⁰ **Esbeltez reducida:** relación entre la resistencia plástica de cálculo y la compresión crítica por pandeo.

¹¹ **Radio de giro:** distancia a la que hay que colocar la totalidad del área de la sección para que la inercia sea la misma que la de la sección de forma dada.

La menor carga crítica de Euler es la del eje x-x, siendo inferior a la carga máxima a soportar, de manera que se calcula la esbeltez reducida para este caso, dado que es el más restrictivo.

$$\bar{\lambda}_k = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{8.324,2 \cdot 275}{879.543,37}} = 1,613 \geq 0,2$$

Como $\bar{\lambda}_k \geq 0,20$, el coeficiente χ de reducción por pandeo se obtiene de:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - (\bar{\lambda}_k)^2}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 5.26.})$$

Donde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_k - 0,2) + (\bar{\lambda}_k)^2] \quad (\text{Ec. 5.27.})$$

- α : coeficiente de imperfección elástica de valor 0,49, según curva de pandeo c, asignada a los acero S275 y secciones rectangulares de tubos de chapa simples conformados en frío.

De este modo,

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,61327 - 0,2) + (1,61327)^2] = 2,1476$$

$$\chi = \frac{1}{2,1476 + \sqrt{2,1476^2 - 1,61327^2}} = 0,2805 \leq 1$$

Así,

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} = 0,2805 \cdot 8.324,2 \cdot \frac{275}{1,05} = 611.594,41 \text{ N} \quad (\text{Ec. 5.28.})$$

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_{yd} = 8.324,2 \cdot \frac{275}{1,05} = 2.180.147,62 \text{ N} \quad (\text{Ec. 5.29.})$$

Donde:

- f_{yd} : resistencia de cálculo del acero, f_y/γ_M con $\gamma_M=1,05$ de coeficiente parcial de seguridad.

Finalmente, $N_{c,Rd}$ es el valor mínimo entre $N_{b,Rd}$ y $N_{pl,Rd}$. Consecuentemente, $N_{c,Rd} = N_{b,Rd} = 611.594,41 \text{ N}$.

$$N^* \leq N_{c,Rd} \rightarrow 24.400 \text{ N} \leq 611.594,41 \text{ N} \quad \checkmark$$

Como se cumple que la resistencia de las barras a compresión es mucho mayor que la carga máxima vertical que debe soportar cada uno de los pilares (aproximadamente 24.400N), la sección escogida en el pre-dimensionamiento es válido.

5.5.3. Comprobación de la estructura por elementos finitos

Para la comprobación de la estructura soporte mediante el método de los elementos finitos¹², se ha empleado el software *Workbench 14.5R de ANSYS*.

En primer lugar, se ha designado el material oportuno a la estructura, que resulta ser de acero estructural S275, el cual presenta las propiedades descritas en el apartado anterior 5.5.2. *Dimensionamiento a pandeo de los pilares*. Como toda la estructura a analizar es homogénea, al proceder con su importación desde el programa de diseño *SolidWorks*, automáticamente queda asignado el mismo material a cada elemento.

Posteriormente se define el mallado, refinándolo al máximo, para simular la realidad de la manera más precisa posible. En este caso, se ha aplicado:

- **Mallado para un estudio de tipo mecánico.**
- **Relevancia:** a partir de este rango de valores se establece cómo de refinado se desea el proceso de mallado. Para la estructura se establece en el máximo valor otorgable, 100.
- **Centro de Relevancia:** entre las opciones permitidas (grueso, medio o fino) se opta por un centro de relevancia fino. Este parámetro, dentro de los valores asignables de relevancia, concede de menor o mayor calidad al valor anteriormente escogido. Es decir, un centro de relevancia medio con relevancia de 100 tendrá un menor número de elementos en el mallado que un centro de relevancia fino con la misma relevancia.
- **Tamaño del elemento:** se deja el valor por defecto, de manera que el programa asigna el tamaño acorde a la geometría y sus aristas. Si se introdujera un valor determinado, los parámetros anteriores ya no serían aplicables porque quedarían anulados.
- **Suavizado:** mejora la calidad del elemento, atribuyéndole una forma más regular, cambiando la posición de los nodos. De las tres opciones (bajo, medio o alto) se escoge el suavizado alto. Así la deformación dentro de los elementos es lo menos pronunciada posible.
- **Transición:** controla el crecimiento de los elementos adyacentes. En los puntos donde existen curvas o aristas el tamaño del elemento es más pequeño y conforme se aleja de ese punto el tamaño del elemento va creciendo.

¹² **Método de los elementos finitos:** método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas. Usado en problemas de ingeniería que requieren de ser simulados.

Si, en lugar de rápido, se selecciona la alternativa de lento, la transición de un elemento pequeño a uno mayor es más lenta, es decir, precisa de más espacio para llegar al tamaño de elemento mayor. Esto facilita la transmisión de fuerzas para el posterior cálculo de las ecuaciones diferenciales.

Una vez creado el mallado, se procede con la aplicación de soportes y cargas sobre el conjunto geométrico, simulando el caso más desfavorable. Éste se da cuando el eje X queda apoyado sobre el centro del vano, por ejemplo, frontal, y el eje Z se sitúa en uno de los extremos del eje anterior. De este modo, uno de los ejes Y estará soportando unos esfuerzos superiores a su paralelo.

Se establecen como soportes fijos las placas bases de cada uno de los pilares y de los apoyos auxiliares. Se trata de una condición de contorno que restringe el movimiento de los nodos que pertenecen a las caras señaladas durante todo el proceso del análisis estático estructural.

Por otro lado, se añaden las cargas correspondientes al peso provocado por los elementos que soporta y por el movimiento de éstos durante la impresión. La distribución puede observarse en la Fig. 5.29.

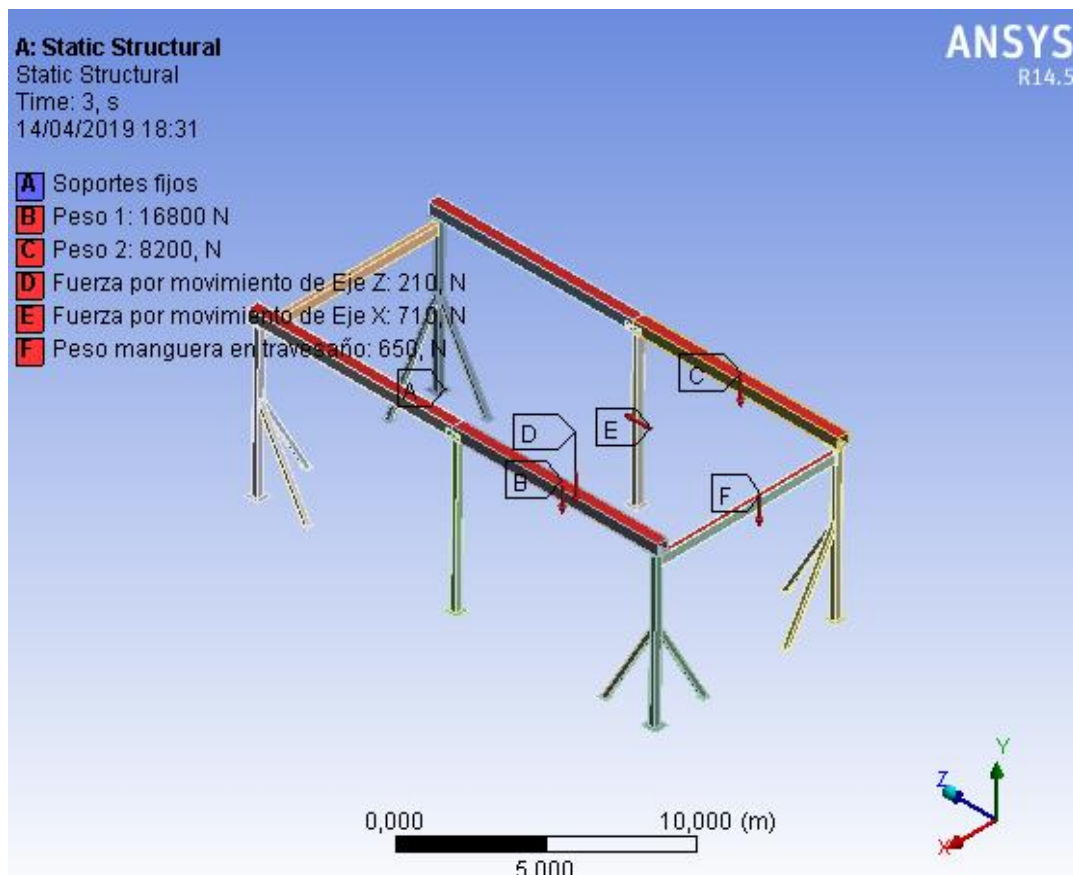


Fig. 5.29. Condiciones de contorno y cargas sobre la estructura soporte.

En la leyenda de la imagen se relaciona lo siguiente:

- A, Soportes fijos.
- B, Peso 1 = 16.800 N. Esta carga se obtiene de la suma de pesos derivados de la totalidad del Eje Z con sus accesorios, de los elementos de transmisión (guías, espaciadores, motor, carro, cadena IGUS,...) de la mitad de uno de los ejes en Y y la parte conveniente de la viga del Eje X junto sus elementos de transmisión. También se considera el peso derivado de la manguera por donde circula el hormigón.
- C, Peso 2 = 8.200 N. Se calcula como la suma del peso del motor, carro, guías, espaciadores del Eje Y del lado opuesto al punto B, así como la parte restante de la viga y los elementos de transmisión del Eje X.
- D, Fuerza por movimiento del Eje Z = 210 N. La carga que supone el Eje Z con todos sus elementos asociados, más la del carro y motor del Eje X, junto los elementos que con ellos se trasladan, se multiplican por la aceleración de $0,333 \text{ m/s}^2$.
- E, Fuerza por movimiento del Eje X = 710 N. La carga del punto D sumada al peso de la viga, guías y espaciadores del Eje X, multiplicada por la misma aceleración.
- F, Peso manguera en travesaño = 650 N.

Tanto en el punto D como E se tiene en cuenta el peso de la manguera.

Finalmente, los resultados que interesa adquirir son los de deformación total y la tensión equivalente de Von Mises¹³. Para la solución de la deformación total, se muestra desplazamiento total que ha sufrido cada una de las partículas sea este movimiento en X, Y o Z. El valor máximo alcanzado ha sido 0,8712 mm, el cual se considera muy bajo.

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (\text{Ec. 5.30.})$$

En cuanto a la tensión equivalente de Von Mises, es una única magnitud escalar que resume el tensor de tensiones de la geometría. Contra mayor es la tensión de un punto, más se opone éste al movimiento. El valor máximo ha estado de 12,03 MPa que, por criterio de fallo, es admisible, ya que no se supera el valor del límite elástico del material, 275 MPa.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq \sigma_Y \quad (\text{Ec. 5.31.})$$

¹³ **Tensión equivalente Von Mises:** magnitud física proporcional a la energía de distorsión. Se emplea como indicador de fallo en el diseño para materiales dúctiles.

Donde:

- $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$: tensiones principales en un punto.
- σ_Y : la tensión de límite elástico del material de la pieza.

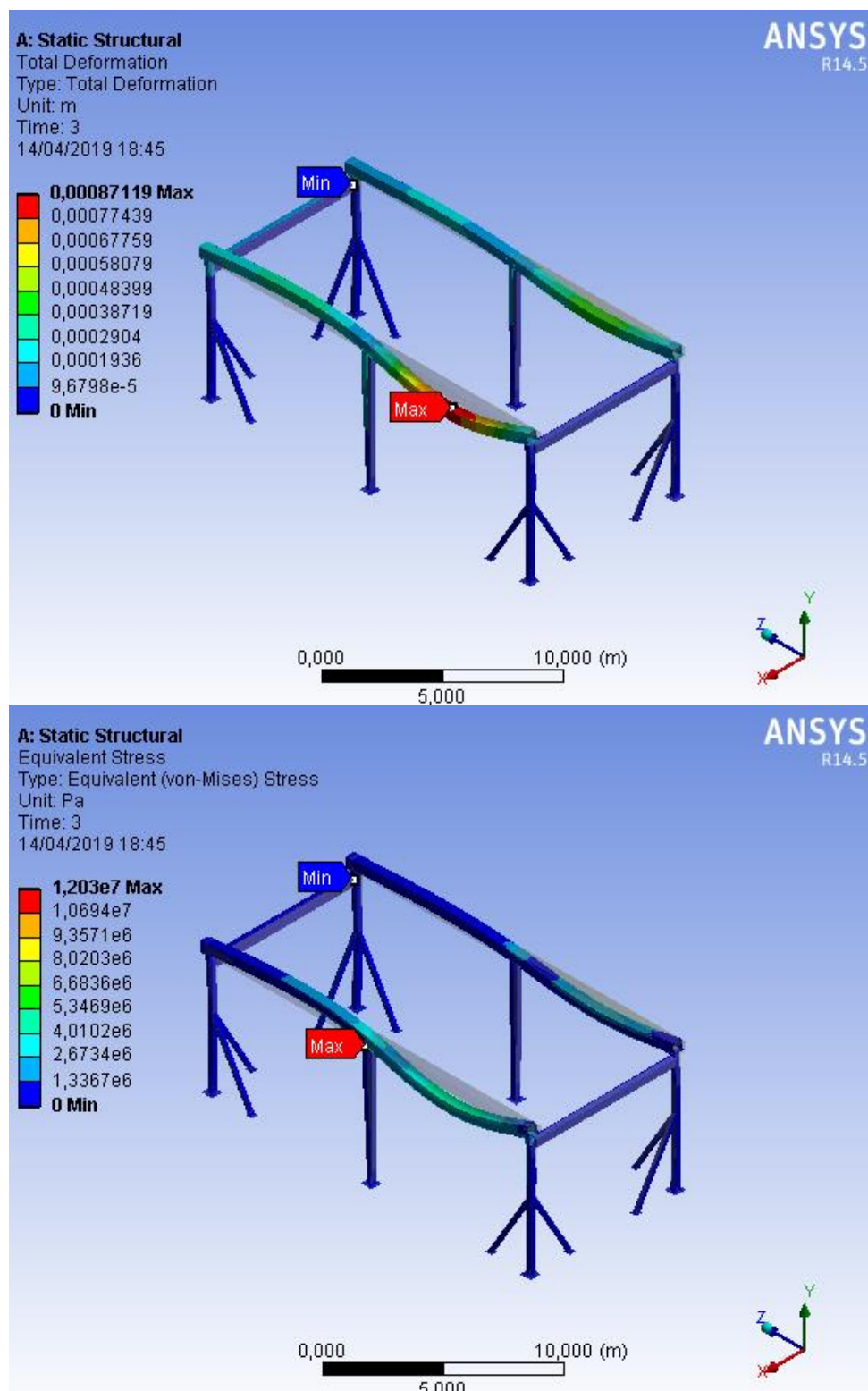


Fig. 5.30. Deformación y tensión de Von Mises de la estructura, con escala de aumento 1,3e+3.

La deformación máxima obtenida a través del cálculo por elementos finitos es de 0,8712 mm. Ésta se da en el centro del vano de uno de los ejes Y y se corresponde con la deformación provocada por la carga de los elementos que debe soportar en el peor de los casos.

Por otro lado, el resultado obtenido mediante el cálculo analítico de la flexión máxima debida al peso de los elementos sobre el eje Y es de 2,298mm.

El punto de mayor deformación es el mismo, puesto que en ambos casos se ha considerado la aplicación de la fuerza en el punto más crítico y donde es susceptible de sufrir mayor deformación. Sin embargo, tal y como puede observarse, los valores no coinciden. Esto puede deberse a que la fórmula utilizada para el cálculo analítico establece que los extremos de la viga se encuentran empotrados y supone un solo vano de longitud de 9,5 m. Los conceptos mencionados no se corresponden con la realidad de la estructura, ya que es necesario tener en cuenta la interacción con los elementos contiguos para obtener un resultado más exacto.

Los extremos de un tramo de la viga en Y se encuentran apoyados sobre pilares que también sufren la deformación derivada de la carga aplicada sobre el eje que soportan. También el vano anexo deforma por continuidad con el vano directamente afectado por la carga. De manera que, parte de la deformación es absorbida por los elementos que se encuentran en contacto con la viga del eje Y, hecho que contribuye a que la deflexión sufrida por ésta sea menor. Por tanto, se considera que la deformación adquirida por elementos finitos es más exacta.

Finalmente, también se debe considerar que la estructura exportada del *SolidWorks* a *ANSYS* puede haber derivado a pequeñas variaciones en las inercias y pesos de los perfiles respecto a los valores teóricos, cosa que influye en los resultados finales.

6. ESTUDIO ECONÓMICO

Para el estudio económico se han contemplado los costes derivados de la investigación y ejecución del proyecto, así como el coste de las licencias de los softwares utilizados.

Concretamente, el coste total queda desglosado en la cuantía correspondiente al diseño conceptual, dimensionado y selección de los componentes, al importe del diseño en CAD mediante la herramienta *SolidWorks* y a la simulación a partir del software *Workbench 14.5R de ANSYS*.

Se ha asignado un valor de 40 € la hora al estudio y desarrollo del proyecto, de 35 € la hora al diseño con *SolidWorks* y de 20 € la hora para el montaje de la impresora. Estimando una dedicación de 350 horas a la elaboración conceptual y a los cálculos de dimensionado, de 100 horas al modelado en 3D y de 25h como tiempo necesario para la simulación en ANSYS, el coste generado es el siguiente:

Concepto	Horas	Precio	Importe
Diseño conceptual, dimensionamiento y selección de componentes	350 h	40 €/h	14.000 €
Licencia del software SolidWorks	2h	30 €/h	60 €
Diseño en CAD	70 h	35 €/h	2.450 €
Licencia del software ANSYS	2h	150 €/h	300 €
Simulación en ANSYS	26h	35 €/h	910 €
TOTAL			17.720€

Tabla 6.1. Coste del proyecto y de instalación del prototipo.

No se ha considerado el coste de adquisición de las diferentes piezas que conforman el conjunto de la impresora ni el coste de producción, puesto que no se dispone del precio unitario de cada uno de los componentes. Tampoco se contempla el coste de los tests de funcionamiento posterior ni el de su transporte.

Como el proyecto se centra en el diseño detallado de la mecánica y la estructura de la impresora, el coste de montaje no se añade en la relación, dado que se dejaría a cargo de una empresa instaladora y no forma parte del proyecto.

7. PLANIFICACIÓN

La duración del proyecto es de 9 meses aproximadamente, lo que significa un total de 450 horas dedicadas. La fecha de inicio del proyecto se acuerda el 30 de Julio de 2018 y finaliza con la entrega final programada entre el 23 al 30 de Abril de 2019.

La planificación del proyecto queda dividida en tres fases diferenciadas, las cuales son: fase inicial, fase de diseño intermedia y fase final.

- **Fase inicial:** esta primera etapa es muy conceptual, ya que consiste en plantear y establecer los objetivos del proyecto y también en definir las especificaciones técnicas que posteriormente se deben considerar para el diseño preliminar de la impresora 3D. Para ello, es preciso buscar y analizar información disponible acerca de los tipos de impresora existentes, la tecnología empleada por éstas y los materiales que pueden imprimir.

De este modo, es posible plasmar la imagen del propósito del proyecto.

- **Fase de diseño:** en esta segunda fase se analizan diferentes alternativas que pueden dar solución al proyecto, justificando las elecciones y eliminando las propuestas que no vayan acordes con las especificaciones técnicas anteriormente planteadas en la fase inicial.

A su vez, dentro de esta fase se realiza un estudio por separado de cada una de las partes que componen la impresora, para escoger la opción que más se adecue al conjunto final.

- **Fase final:** seleccionadas las alternativas es posible confeccionar el diseño detallado de la máquina, plasmando los cálculos y estudios finales. Al mismo tiempo, se modela el diseño final en 3D y se añade el estudio económico, el cual pretende mostrar el coste y la rentabilidad del proyecto.

Todo ello se documenta durante esta última fase que, una vez terminada, daría inicio a una nueva basada en la fabricación del prototipo real, que permita determinar si la funcionalidad es correcta y si los resultados obtenidos son suficientes para poner en práctica el proyecto y dar salida en el mercado a la impresora diseñada.

A continuación se adjunta una tabla donde se especifican las tareas que engloban cada una de las fases del proyecto.

Id	Tarea	Duración	Inicio	Fin
FASE INICIAL				
1	Estado del arte	28 días	30/07/2018	26/08/2018
2	Definición de las especificaciones	7 días	27/08/2018	02/09/2018
FASE DE DISEÑO				
3	Análisis de alternativas	11 días	03/09/2018	13/09/2018
4	Elección de transmisión de movimiento	21 días	14/09/2018	04/10/2018
5	Elección de motores	32 días	01/10/2018	01/11/2018
6	Eje X	15 días	02/11/2018	16/11/2018
7	Evaluación parcial	5 días	12/11/2018	16/11/2018
8	Eje Y	34 días	10/11/2018	13/12/2018
9	Elección de fin de carrera y soporte de cables	7 días	14/12/2018	20/12/2018
10	Eje Z	19 días	21/12/2018	08/01/2019
11	Estructura soporte – travesaños y apoyos	8 días	09/01/2019	16/01/2019
12	Estructura soporte - pilares	15 días	17/01/2019	31/01/2019
FASE FINAL				
13	Diseño detallado del prototipo	20 días	01/02/2019	20/02/2019
14	Estudio económico	2 días	21/02/2019	22/02/2019
15	Preparación de la documentación	66 días	23/02/2019	26/04/2019
16	Plazo de entrega	7 días	23/04/2019	30/04/2019
17	Preparación de la presentación	9 días	27/04/2019	05/05/2019
18	Plazo de presentación	14 días	08/05/2019	21/05/2019

Tabla 7.1. Programación temporal del proyecto.

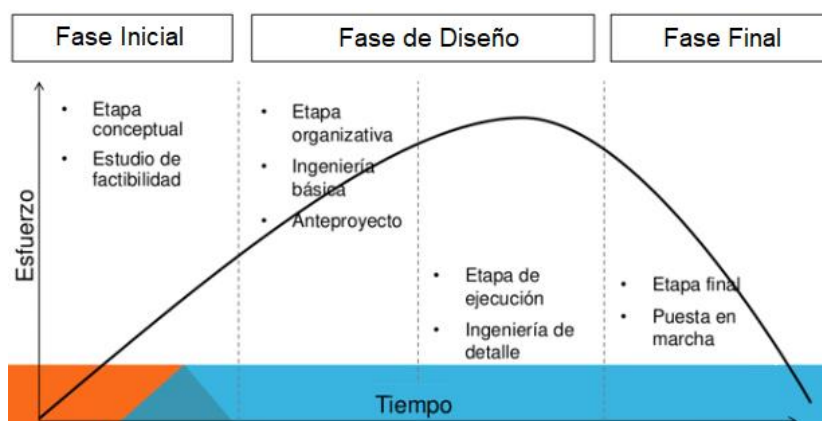
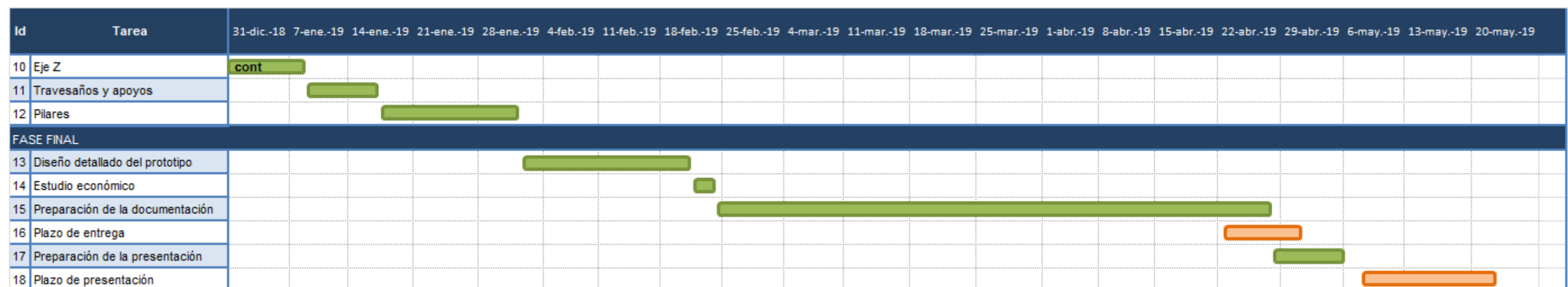
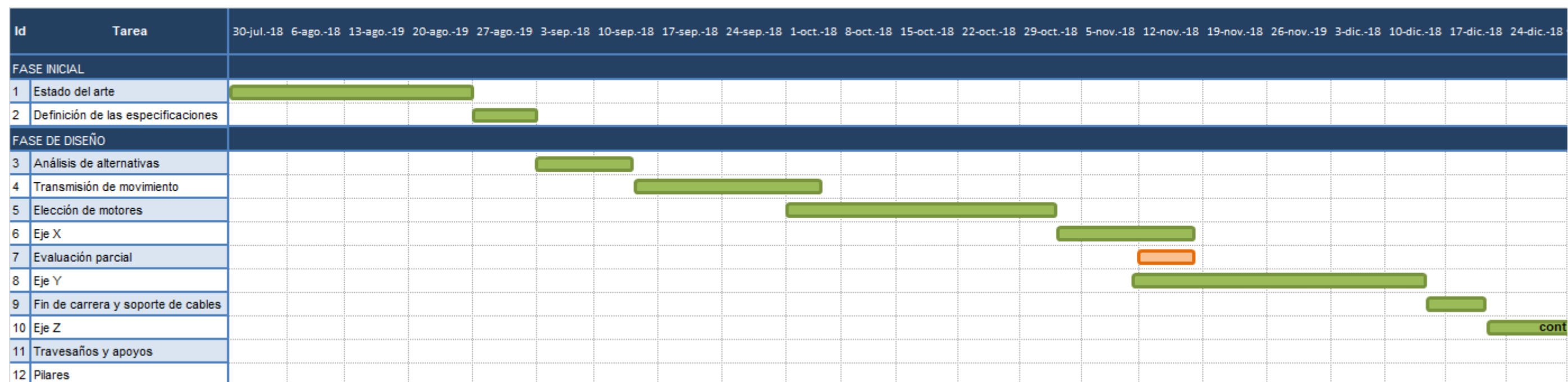




Fig. 7.1. Relación del esfuerzo y el tiempo, en función de la etapa del proyecto.



Leyenda	 Diseño mecánico	 Evaluación	cont Continuación del Gantt
---------	---	--	------------------------------------

8. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El impacto ambiental que se argumenta a continuación, puede dividirse en tres vertientes:

- Impacto ambiental debido al uso de las tecnologías de impresión 3D para la construcción.
- Impacto derivado de la fabricación y fin de la vida útil de la impresora 3D diseñada en este proyecto.
- Impacto ambiental relacionado con el material utilizado para las impresiones durante el funcionamiento de la máquina.

8.1. Impacto ambiental de las tecnologías de impresión 3D



Fig. 8.1. Unidad de mezcla y suministro automatizados [17].

Comparado con otros procesos de fabricación, la impresión 3D tanto fuera como dentro del sector constructivo, consigue reducir parte de los residuos generados. Esto es debido a que la materia prima, es decir, el material a extruir, se suministra a la impresora en el momento de la impresión y éste se convierte directamente en el producto final. No se precisa de desplazamientos para el transporte del material ya fabricado ni del empleo de moldes para la fabricación de las paredes, cosa que permite reducir el consumo de combustibles y recursos naturales.

Aunque se sigue con la necesidad de incluir los techos, ventanas, puertas y armaduras para reforzar el hormigón, mediante la colaboración de mano de obra, es posible disminuir su participación en la cimentación de la estructura, lo que implica un menor número de accidentes laborales y una reducción de costes en términos del proceso de fabricación.

Todo ello, además, se traduce en un menor coste de la edificación y, por tanto, en un ahorro económico para el cliente final.

8.2. Impacto ambiental de la fabricación de la impresora

Particularmente, en la fabricación del prototipo de la impresora diseñada, los materiales de las piezas son básicamente el aluminio y el acero. Los dos materiales son reciclables, de modo que permiten reducir el gasto energético que supone su fabricación.

Las piezas que han sido diseñadas particularmente para la impresora se fabrican con materiales reciclados con el fin de disminuir el impacto ambiental. Mientras que los componentes proporcionados por proveedores, se gestionarán una vez finalizada su vida útil para que los residuos causen el mínimo impacto.

Por lo que a los motores respecta, el proveedor Rexroth reutiliza y aprovecha los desechos generados durante el proceso de producción para fabricar parte de sus productos, optimizando el consumo de energía y materia prima. Además, sus motores no contienen materias peligrosas que puedan liberarse durante su funcionamiento. Por tanto, no deberían tener un impacto medioambiental negativo.

En referencia a las cadenas portacables IGUS, cuentan con varias certificaciones y cumplimiento de directivas, que restringe el uso de materiales peligrosos y asegura la gestión de residuos.

8.3. Impacto ambiental del material de impresión

A lo largo de la vida útil de la impresora, el impacto en el medio ambiente se basa en el gasto energético y el consumo de hormigón como material de impresión.

La demanda de arena y grava de la industria es mayor a la capacidad de producción de la naturaleza. A parte de este hecho, la fabricación de cemento emite gases que contribuyen al efecto invernadero. Por esta razón, el tipo de hormigón que se usaría se compondría a partir de residuos generados durante y después del proceso de impresión 3D. Entonces, estos desechos contaminantes se convertirían en recursos y contribuirían al descenso de la huella ecológica¹⁴.

Su composición, a más a más, se mezclaría sin necesidad de intervención humana y se basaría en termoplásticos y agentes de fusión, entre otros.

¹⁴ **Huella ecológica:** indicador del impacto ambiental que relaciona la demanda humana de los recursos presentes en los ecosistemas del planeta con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar esos recursos.

9. CONCLUSIONES

Tras acabar el diseño del prototipo de la impresora 3D, se puede concluir que las especificaciones implantadas en el apartado 3 se han cumplido con éxito. Para demostrarlo, se adjunta a continuación una tabla comparativa entre las especificaciones técnicas impuestas y las características finales del diseño.

	Especificaciones técnicas impuestas	Características del diseño	Cumplimiento
DIMENSIONES			
Dimensiones máx. impresora	20 x 10 x 10 m ³	19 x 9,36 x 8,6 m ³	✓
Área máx. de impresión	170 m ²	138,84 m ²	✓
Altura máx. de impresión	8m	6,3 m	✓
Peso máx. impresora	150.000 N	99.490 N	✓
Peso máx. del eje Z	5.000 N	3.130 N	✓
ESPECIFICACIONES DE IMPRESIÓN			
Mín. velocidad de impresión	20 m/min	24 m/min	✓
Motor de los ejes X / Y / Z	Servomotor	Servomotor	✓
Alimentación	Trifásica alterna	Trifásica alterna	✓
Máx. flexión de la flecha	± 40 mm	19, 832 mm	✓
Materiales de impresión	Hormigón	Hormigón	✓
Número de cabezales	1	1	✓
Impresión de Multi-material	No	No	✓
Tecnología de impresión	Extrusión de material	Extrusión de material	✓
INSTALACIÓN			
Tiempo máx. instalación	72 horas	24 horas	✓

Tabla 9.1. Comparativa entre especificaciones técnicas impuestas y características del diseño.

Como puede observarse en la tabla anterior, las características dimensionales permiten alcanzar el objetivo principal del proyecto. Por área de impresión y altura de la impresora es factible construir la estructura de una vivienda de hasta dos alturas.

Respecto a las impresoras detalladas, como BigDelta, BOD2 y ApisCor, la superficie de operación de la máquina de este proyecto es muy competitiva. Si además se compara el requisito de la carga para extrusión, se comprueba que aumenta ligeramente en comparación con las existentes, proporcionando de más autonomía en la impresión.

Otra diferencia respecto a las impresoras del sector de la construcción es su ensamblaje. La sencillez de sus componentes y sus uniones atornilladas permiten que la impresora sea fácilmente transportable e instalada en un tiempo reducido. Primeramente, sería preciso un montaje previo de los elementos de transmisión sobre las vigas de los ejes X e Y, así como el ensamblaje de los motores en los carros. Esto supondría, que la primera vez, el tiempo de instalación fuese mayor a 24h. Posteriormente, teniendo parte del montaje de los elementos realizado, el tiempo de instalación se vería reducido a un día.

Sin embargo, al tener una dimensión mayor respecto a otras impresoras de la construcción y constituirse por una estructura más rígida, supone que la carga a desplazar sea elevada. Por este motivo, un detalle a mejorar sería el peso total de la impresora, optimizando la distribución y elementos utilizados como soporte, y estudiando la posibilidad de modificar el material de algunos ejes.

Asimismo, a pesar de cumplir con las especificaciones, hay otros aspectos que podrían ser objeto de estudio para ser mejorados. Después de analizar las diferentes partes de una impresora como la diseñada, se ha observado que el material y el mecanismo para ser extruidos son muy importantes por su influencia en el resto de componentes. Por tanto, un factor esencial para completar el diseño propuesto es el diseño de un cabezal de extrusión específico para la máquina.

Por último, a nivel personal, este proyecto ha permitido:

- Ampliar la capacidad de búsqueda y selección de información.
- Adquirir mayores conocimientos de los elementos mecánicos.
- Aprender a resolver problemas basados en necesidades reales.
- Mejorar el manejo de los softwares SolidWorks y ANSYS.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer la ayuda y apoyo recibido a las personas que han hecho posible la elaboración del presente proyecto. En primer lugar, mostrar mi gratitud a Emilio Angulo, director del proyecto, por la paciencia y atención puesta en mí, la contribución en la adquisición de nuevos conocimientos a partir de los suyos y la participación en la búsqueda de información.

También agradecer a aquellos compañeros y familiares que han mostrado su apoyo y, en especial, a Ibai Vivas, por su contribución en el aporte de información, sus correcciones y sugerencias durante la realización del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

Referencias bibliográficas

- [1] <https://ovacen.com/tecnologia-onbras-casa-impresora-3d/>
- [2] D. Holland, G. O'Donnell and G. Bennett, *Open Design and the Reprap Project*.
- [3] Extruders <http://reprap.org/wiki/>
- [4] *3D Printing Industry, History of 3D Printing: The Free Beginner's Guide*, 2014.
[<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>]
- [5] <http://www.custompartnet.com/>
- [6] <http://www.3dcons.eu/>
- [7] IJCIET, International Journal of Civil Engineering and Technology, *3D Concrete Printing: Machine and Mix Design*. Vol. 6, Art. 6, Junio 2015, p. 14-22
- [8] <https://d-shape.com/>
- [9] LIM, S., BUSWELL, R.A., LE, T.T., AUSTIN, S.A., GIBB, A.G.F. and THORPE, T. *Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction*, Vol. 21 (1), 2012, p. 262-268.
- [10] Seyed Hamidreza ghaffar, Corker, J., Fan, M. *Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. Automation in Construction*, Vol. 93, Septiembre 2018, p.1-11
- [11] Weinstein, D., & Nawara, P. (2015). *Determining the applicability of 3D concrete construction (contour crafting) of low income houses in select countries*. Cornell Real Estate Review, Vol. 13, Art. 11, p. 94-111.
- [12] Dooil Hwang and Behrokh Khoshnevis, *An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)*, 2005.
- [13] <http://contourcrafting.com/>

- [14] Peng Wu , Jun Wang and Xiangyu Wang, *A critical review of the use of 3-D printing in the construction 2 industry*.
[https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/7988/240556_240556.pdf?sequence=2]
- [15] <http://www.winsun3d.com/>
- [16] Freek Bos, Rob Wolfs, Zeeshan Ahmed & Theo Salet, *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*, Vol. 11, nº 3, 2016, p. 209-225.
- [17] <http://apis-cor.com/>
- [18] <http://cobod.com/>
- [19] Paul Bosscher, Robert L. Williams II, L. Sebastian Bryson, Daniel Castro-Lacouture, *Automation in Construction: Cable-suspended robotic contour crafting system*, Febrero de 2007, p. 44-55.
- [20] Henrik Lung-Nielsen, 3D construction Printing. *A Worldwide overview, The Danish Partnership for 3D Construction Printing*.
- [21] [<http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/IDA%20konferencen%20PP/4.%20HLN.pdf> , 11 de Diciembre de 2018], [Presentación de Diapositivas].
- [22] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Miguel Cervera Ruiz y Elena Blanco Díaz, Resistencia de Materiales, CIMNE.
- [23] www.boschrexroth.com
- [24] www.hepcomotion.com/es
- [25] *Documento Básico, Seguridad estructural Acero*, DB SE-A, Marzo 2006.

Bibliografía complementaria

- [1] <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/history-of-3d-printing-milestones/>
- [2] <https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/>
- [3] <https://tfmrimuned.wordpress.com/fotopolimerizacion-por-luz-ultravioleta-sgc/>
- [4] IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 324, *Large-Scale 3D Printing: The Way Forward*, 2018.
- [5] <https://impresiontresde.com/tecnologias-de-impresion-3d-industrias/>
- [6] <http://www.totalkustom.com/>
- [7] <https://www.tue.nl/en/our-university/departments/built-environment/research/>
- [8] <https://www.3dwasp.com/>
- [9] <https://www.autodesk.com/redshift/drone-3d-printer/>
- [10] <https://www.materialise.com/es/>
- [11] <https://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-print-structures-of-any-size>
- [12] <https://www.curbed.com/2016/6/28/12053256/3d-printer-concrete-construction-netherlands>